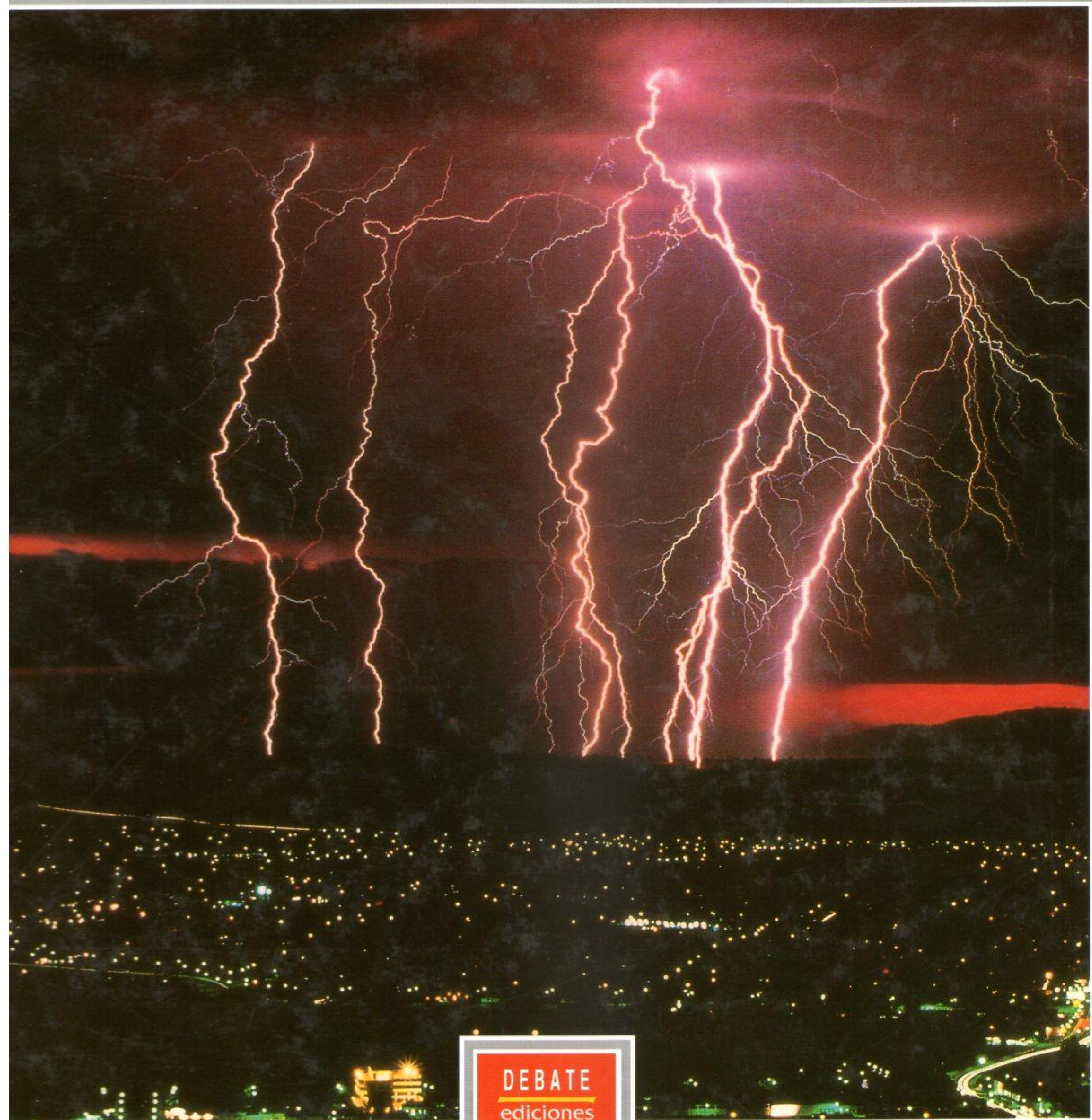
ATLAS de lo EXTRAORDINARIO

Fenómenos naturales

VOLUMEN I



DEBATE
ediciones delPrado

ATLAS DE LO EXTRAORDINARIO

FENÓMENOS NATURALES

Volumen I

A Esmor Jones con gratitud

Dirección editorial de la serie:
Juan María Martínez
Ángel Lucía

Coordinación editorial de la serie:
Juan Ramón Azaola
Carlos Ponce

Dirección técnica de la serie:
Eduardo Peñalba

Coordinación técnica de la serie: Rolando Dias
Edición: Luis G. Martín, Íñigo Castro y Lourdes Lucía
Fotografía y documentación gráfica: José María Sáenz Almeida, Marta Carranza, Juan García Costoso, Nano Cañas, Anne-Marie Ehrlich y Pat Hodgson
Ilustraciones y dibujos: Tony de Saulles
Ilustraciones de la Microenciclopedia: Dover Pictorial Archive Series
Mapas: Ed Stuart
Suscripciones: Francisco Perales
Texto: Arthur Cotterell
Versión castellana: Horacio González Trejo

Título original: *The Illustrated Encyclopedia of Myths & Legends*

ISBN: 84-7444-422-5 Volumen II
Depósito legal: B-4.790-1993
Impreso en Abril de 1994

Impreso y encuadernado en Edigraf, Barcelona

Foto de cubierta: *Venus, Baco y las Tres Gracias*. Fotografía de Noel-Nicolas Coypel (Museo de Arte e Historia, Ginebra).

ATLAS DE LO EXTRAORDINARIO

FENÓMENOS NATURALES

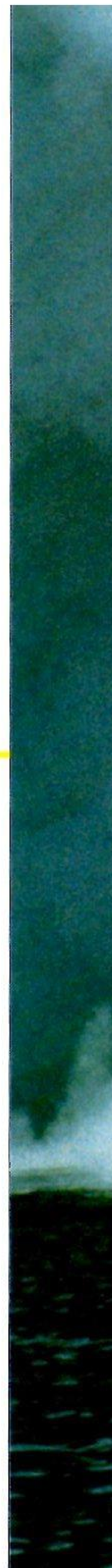
Volumen I

DEBATE
ediciones del Prado

Sumario

Volumen I

Introducción



En nuestro planeta abundan los lugares impregnados de misterio. Muchos de ellos son obra del hombre, pero los más intrigantes y sobrecogedores son los lugares y fenómenos naturales que forman parte integrante de la Tierra misma.

Aunque son objeto de una intensa y rigurosa investigación científica, estos parajes y situaciones misteriosos conservan su capacidad de evocar maravillas y excitar la imaginación. La ciencia puede aportar numerosas explicaciones convincentes, a pesar de lo cual muchos de estos fenómenos continúan resultando evasivos y enigmáticos.

Las páginas de este libro equivalen a un recorrido por las maravillas de nuestro planeta, desde lo familiar a lo insólito. Los misterios que encontraremos son muchos y muy diversos. A veces se trata de procesos impulsados por fuerzas a las que no prestamos ninguna atención en nuestra vida cotidiana, como la gravedad que provoca las mareas del océano. En otros casos, son consecuencia de la actividad que tiene lugar bajo la tierra que pisamos, donde el lento pero infinitamente poderoso desplazamiento de las placas continentales ocasiona temblores y erupciones volcánicas, géiseres y olas gigantes. Y no olvidemos los fenómenos climáticos: maravillas de ritmo lento, como las misteriosas fluctuaciones de El Niño; relámpagos y tornados que son casi instantáneos; y fenómenos extravagantes como la lluvia roja y las lluvias de animales.

En el telar de la actividad planetaria se tejen paisajes enteros, repletos de complejidad y misterio. Algunas combinaciones de geología, fauna y flora, como la Gran Fosa Tectónica africana o el mar de los Sargazos, jamás dejan de maravillar al que las contempla.

Las fuerzas misteriosas de la naturaleza determinan la fisonomía de nuestro mundo. En estos tiempos de preocupación por el futuro de nuestro planeta, la tarea de adivinar sus secretos y conservar sus maravillas para las generaciones futuras ha adquirido más importancia que nunca.



El 14 de noviembre de 1963, una violenta explosión volcánica bajo las frías aguas al sur de Islandia anunció uno de los acontecimientos más espectaculares y misteriosos de los tiempos modernos: la formación de una nueva isla, Surtsey, que ha proporcionado a los científicos una ocasión única para estudiar la colonización de tierra estéril por las plantas y animales y constatar la expansión de la vida sobre la Tierra.

Conexiones cósmicas

Nuestro mundo, el planeta Tierra, está repleto de maravillas y misterios. Posiblemente, el más notable es uno en el que apenas se suele reparar: la extraordinaria circunstancia de que vivamos sobre la superficie de una delgada capa de roca maciza que flota en lava fundida y que da vueltas a través del espacio. Mientras cavamos en el jardín, nos lavamos los dientes, damos de comer al niño, hacemos el amor o nos desplazamos al trabajo, estamos al mismo tiempo recorriendo la inmensidad del espacio interestelar, pegados a la superficie de un planeta rocoso y protegidos tan sólo por una fina capa de atmósfera habitable. ¿Puede haber algo más misterioso que esta desconcertante incongruencia de llevar una vida normal a bordo de una nave espacial planetaria, aparentemente tan vulnerable?

Mientras lee usted estos párrafos, creyendo estar inmóvil, la rotación de la Tierra le hace dar vueltas a una velocidad aproximada de 800 km/h; al mismo tiempo, la traslación del planeta alrededor del sol le impone una velocidad de más de 80.000 km/h a lo largo de la órbita. Y tanto usted como el resto del sistema solar dan vueltas en torno al eje de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Nuestro sol, con sus planetas subordinados, no ocupa una posición especial en el universo. Es una entre millones de estrellas que forman una galaxia espiral, que a su vez es una isla en medio del océano cósmico. Y es que nuestra galaxia, que los antiguos bautizaron Vía Láctea porque sus innumerables estrellas parecían fundirse en una franja lechosa que cruza el cielo nocturno, tampoco es un fenómeno único, sino una más entre las incontables miríadas de galaxias del universo conocido.

Aunque apenas pensemos en ello, resulta imposible eludir por completo el contexto cósmico de nuestras vidas, ya que el trasfondo cosmológico se entromete en nuestra vida cotidiana sin que muchas veces nos demos cuenta, y de maneras que la ciencia moderna sólo puede explicar en términos generales. El sol y la luna son la causa de las mareas, y el sol es el motor de la maquinaria climática, tanto en sus manifestaciones diarias como en sus variaciones a lo largo de los milenios, provocadas por variaciones en la órbita y la rotación de la Tierra misma. Los cien-



La galaxia M33, una galaxia espiral muy similar a nuestra Vía Láctea.

tíficos reconocen que nuestro conocimiento de estas cuestiones es parcial e inexacto, y sus teorías siguen estando plagadas de misterios, aspectos del mundo real que no tienen explicación.

Los pueblos antiguos tenían modelos del universo diferentes de los nuestros, y también sus misterios eran diferentes. Su ciencia era menos compleja que la nuestra, pero servía para describir el mundo tal como ellos lo concebían. Sencillamente, los conceptos antiguos tenían que explicar menos hechos.

En todas las épocas se ha dado la falacia de considerar que la ciencia moderna acaba de atravesar la barrera de la ignorancia, que la última teoría propuesta es *la* teoría que despeja todas las incógnitas. Los físicos, por ejemplo, creían encontrarse en esta situación a principios del siglo XX, hasta que el gran científico Albert Einstein, con su teoría de la relatividad, acabó con esta sensación de satisfacción.

Hay quien cree saber cómo afectan a nuestro planeta y nuestras vidas las influencias cosmológicas, pero en realidad nuestra ignorancia es casi total en muchos campos. Por ejemplo, sólo tenemos una ligerísima idea del efecto de los ciclos de perturbaciones magnéticas en el sol, que se manifiestan en forma de llamaradas, prominencias y manchas solares, y que a su vez influyen en el clima, las trasmisiones de radio y, sin duda, en actividades más sutiles, como la orientación de los animales migratorios.

Los horóscopos, los radiotelescopios y la matemática profunda de la teoría del «Big Bang» son sólo tres maneras diferentes de intentar superar el temor reverencial a la inmensidad y los misterios del universo.

Sin embargo, no deberíamos tener miedo de los misterios, ya que, como dijo el propio Albert Einstein, «lo misterioso es lo más bello que uno puede experimentar».

La luz del mundo

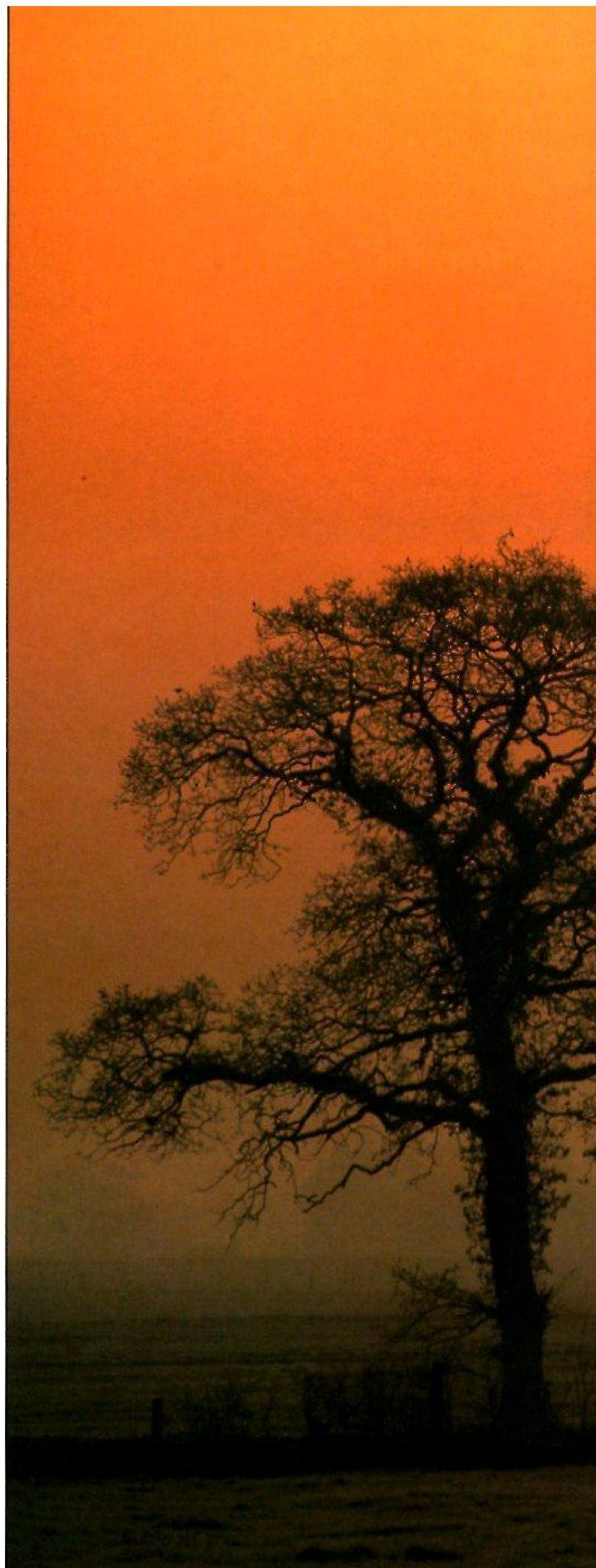
No tiene nada de extraño que todas las razas y todos los pueblos hayan adorado al sol en uno u otro momento. ¿Cabe actitud más racional que la de formalizar en una religión el temor reverencial que todos sentimos ante tan formidables poderes? Una entidad que proporciona luz y calor con infalible regularidad, que hace crecer las cosechas y transforma la noche en día, posee muchos de los atributos de un dios. Lo único que ha hecho la ciencia moderna es sugerir mecanismos que expliquen los extraordinarios poderes e influencia del sol.

Consciente de la conexión que existe entre el sol y la Tierra, la humanidad siempre ha sentido deseos de conocer los orígenes de ambos cuerpos. ¿De dónde salieron el sol y la Tierra? Es ésta una pregunta —y un misterio— que todos los pueblos, todas las religiones y todas las personas con uso de razón se han planteado en alguna ocasión.

Casi todos los mitos y leyendas sobre el origen del mundo lo presentan conectado al origen de la humanidad. La fuerza motriz de esta doble creación es, casi inevitablemente, una figura divina, por lo general ralacionada de algún modo con el sol. Los modelos modernos de la creación no tienen que recurrir a un dios que ponga en marcha el proceso creativo, pero esta simplificación no ha hecho que los conceptos resulten menos sobrecogedores.

Los cosmólogos opinan que el sol y la Tierra se formaron casi al mismo tiempo, hace unos cinco mil millones de años, a partir de una inmensa nube de gas y polvo que fue el origen de todo el sistema solar. Bajo el efecto de la gravitación, la nube se fue condensando, concentrando cada vez más materia en su zona central.

Poco a poco, este proceso condujo a la formación de una masa rotatoria con un abultamiento en el centro. El abultamiento se fue comprimiendo por efecto de la gravitación, convirtiéndose en una masa cada vez más densa, hasta que la temperatura y la presión alcanzaron niveles capaces de inducir la fusión termonuclear, el



La salida del sol entre la niebla de un día otoñal manifiesta a la perfección el misterio y majestad de la estrella, de la que nuestro planeta depende en todos los aspectos de su existencia.

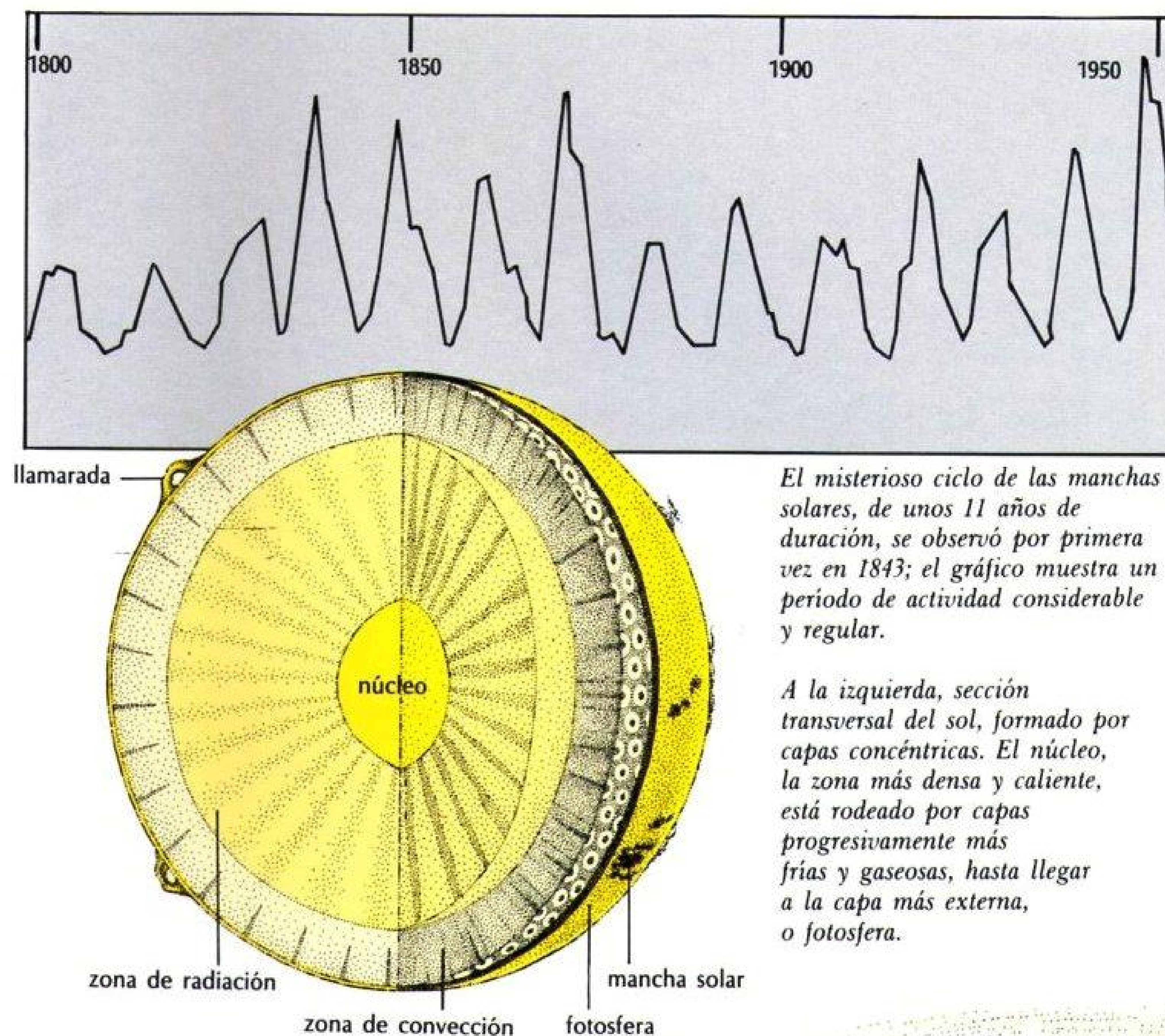


mismo proceso que tiene lugar en el núcleo de una bomba de hidrógeno. Había nacido una estrella que empezó a irradiar energía calórica y lumínica con una intensidad que no ha disminuido en cuatro mil millones de años. El disco de materia desprendido por la nube definió el plano orbital de los futuros planetas del sistema solar, formados por condensación del polvo y el gas que componían dicho disco.

La potencia del sol como fuente de energía ha constituido un misterio desde que los seres humanos levantaron por primera vez los ojos hacia el cielo y se preguntaron por el origen de su calor y su luz, aparentemente inagotables. Los antiguos suponían que el sol se mantenía encendido mediante inmensas hogueras, y nuestros conocimientos no avanzaron mucho hasta principios del siglo XX.

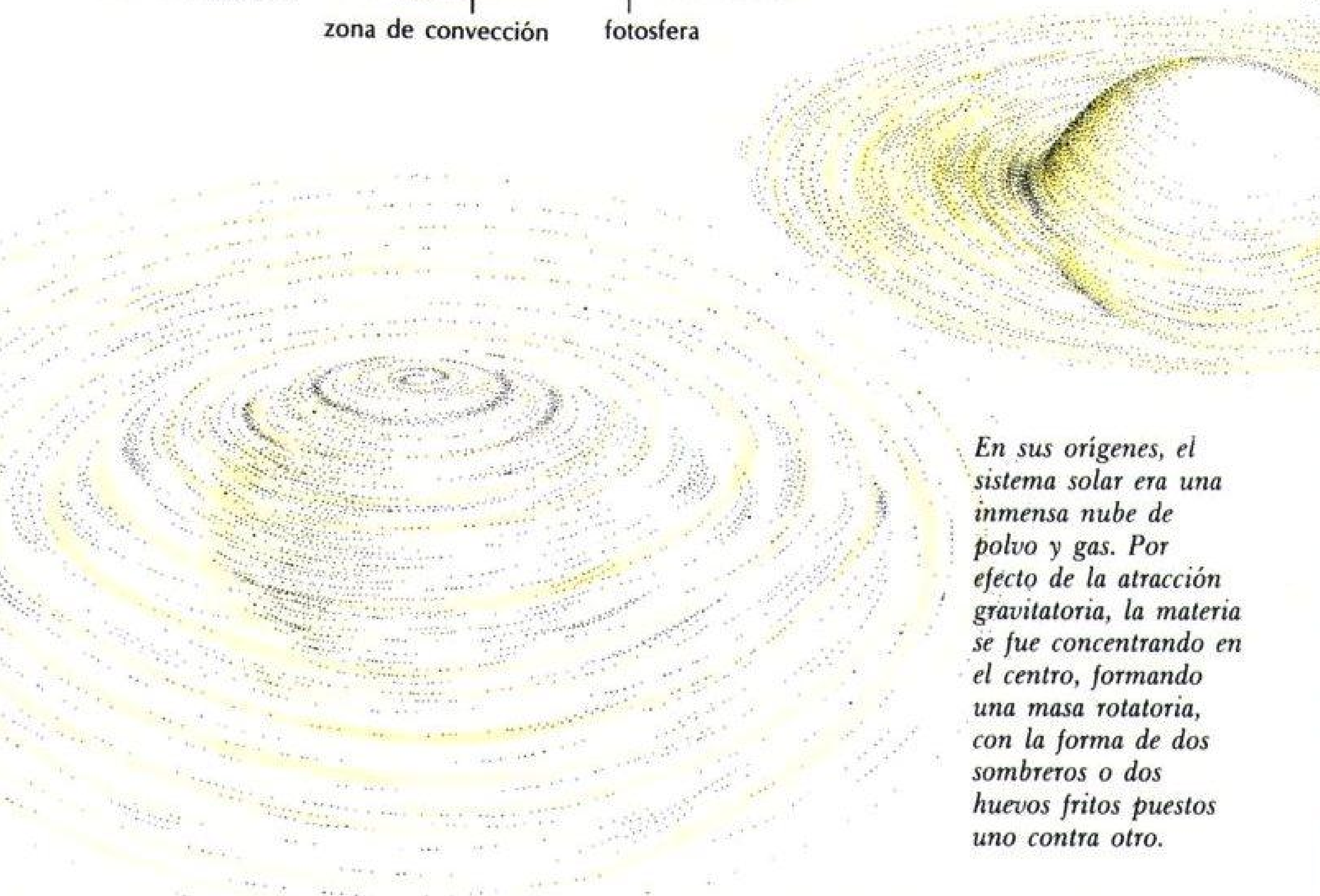
En 1908, el físico norteamericano Hermann Helmholtz consideró la posibilidad de que el sol estuviera compuesto por una mezcla de oxígeno e hidrógeno y produjera su luz y su calor mediante la combustión de estos dos gases. Esta idea parecía plausible en aquel momento, ya que se sabía que el hidrógeno es el principal componente del sol. Pero Helmholtz descubrió que, aunque el diámetro solar mide 1,3 millones de kilómetros —más de 100 veces el diámetro de la Tierra—, el combustible se le agotaría en 3.000 años si funcionara de esta manera. Puesto que el sol lleva existiendo más de cuatro mil millones de años, la explicación resultaba del todo insostenible.

Veinte años antes de que Helmholtz realizara sus cálculos, el astrónomo británico sir Norman Lockyer había intentado resolver el misterio del enigmático origen de la energía solar, mediante una hipótesis aun más extravagante: suponía que todas las estrellas obtenían su energía del constante bombardeo de su superficie por una enorme cantidad de meteoritos; pero esta teoría tampoco podía explicar el rendimiento continuado de nuestra estrella a lo largo de los eones.



El misterioso ciclo de las manchas solares, de unos 11 años de duración, se observó por primera vez en 1843; el gráfico muestra un período de actividad considerable y regular.

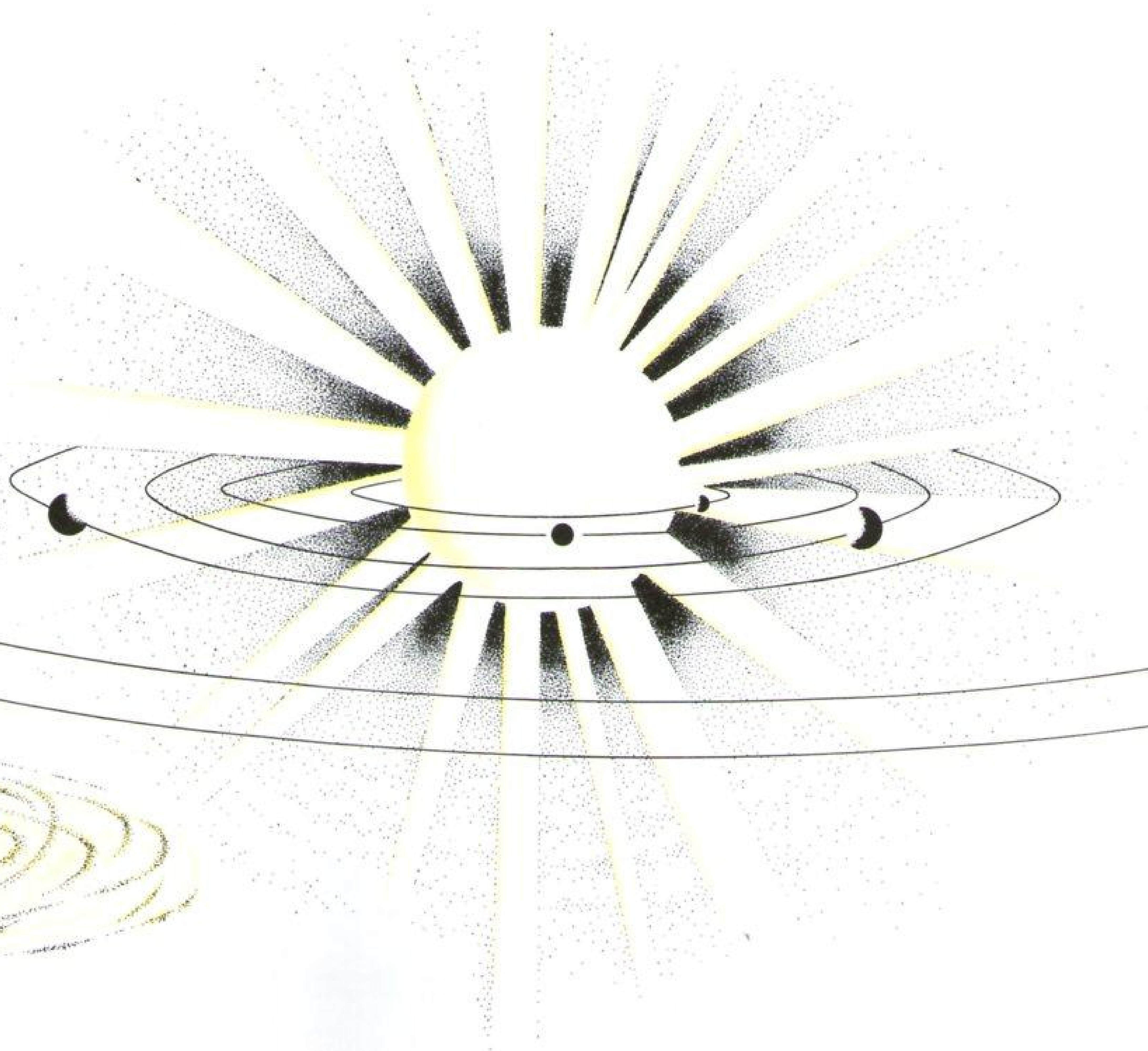
A la izquierda, sección transversal del sol, formado por capas concéntricas. El núcleo, la zona más densa y caliente, está rodeado por capas progresivamente más frías y gaseosas, hasta llegar a la capa más externa, o fotosfera.



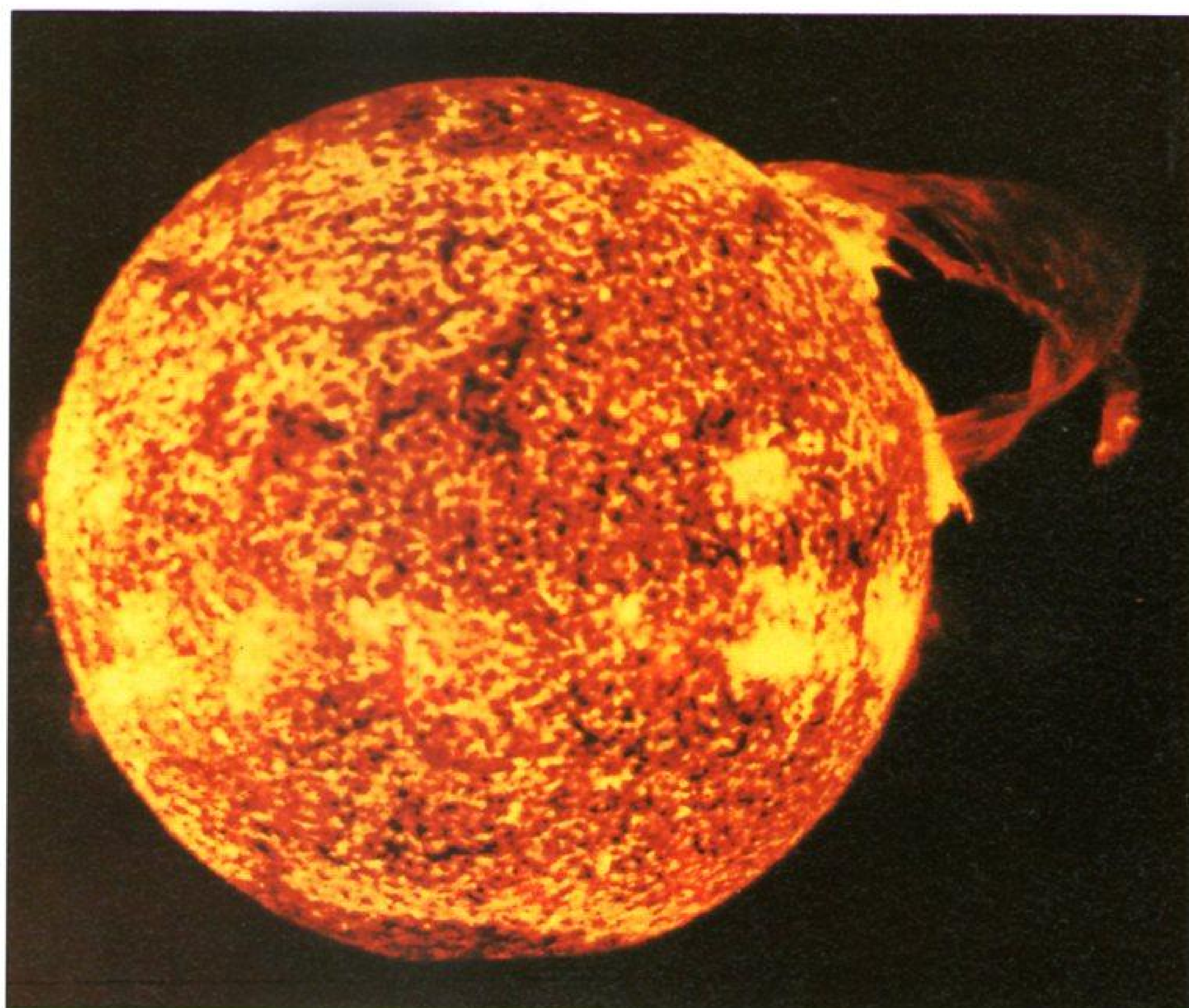
En sus orígenes, el sistema solar era una inmensa nube de polvo y gas. Por efecto de la atracción gravitatoria, la materia se fue concentrando en el centro, formando una masa rotatoria, con la forma de dos sombreros o dos huevos fritos puestos uno contra otro.

En 1914, el norteamericano Henry Russell y el danés Ejnar Hertzsprung avanzaron un paso más hacia nuestro moderno concepto del origen de la energía estelar, con la publicación de un estudio sobre la relación entre el brillo y el color de las estrellas y la edad de las mismas: el llamado esquema de Hertzsprung-Russell. Estos decubrimientos orientaron la atención hacia los mecanismos de producción de energía en las estrellas; al principio, Russell creía que la energía procedía del choque entre protones con carga positiva y electrones con carga negativa, que se destruían mutuamente. Aunque resultó estar equivocado, esto representó un nuevo paso adelante en la dirección adecuada.

El paso definitivo se dio en los años inmediatamente anteriores a la segunda guerra mundial. En 1927, habiéndose comprobado que los dos gases más abundantes en el sol son el hidrógeno y el helio, sir Arthur Eddington sugirió que la fuente de energía era la trasmutación de elementos. A temperaturas y presiones lo bastante altas, los núcleos de dos átomos de hidrógeno podían fusionarse para crear núcleos de helio, y este proceso de fusión nuclear des-



La masa central se fue comprimiendo en un cuerpo cada vez más denso, hasta que la temperatura y la presión alcanzaron niveles suficientemente altos para inducir la fusión termonuclear. La estrella así creada empezó a emitir enormes cantidades de luz y calor. El resto de la nube de materia siguió condensándose hasta formar los planetas.



Las espectaculares protuberancias de materia más densa y fría que se forman en la capa gaseosa más externa del sol son magníficos indicadores de la actividad solar. Esta imagen en colores simulados, fotografiada desde el laboratorio espacial Skylab en 1978, muestra una de las protuberancias más grandes que jamás se han observado, cuya erupción duró unas dos horas.

prendería cantidades enormes de energía. Los cálculos demostraron que si el hidrógeno se «quemara» de este modo, podría durar millones de años.

En 1939, el físico norteamericano Hans Bethe perfeccionó la teoría de la fusión de Eddington, al darse cuenta de que el sol contiene una pequeña cantidad de átomos de carbono que podrían actuar como

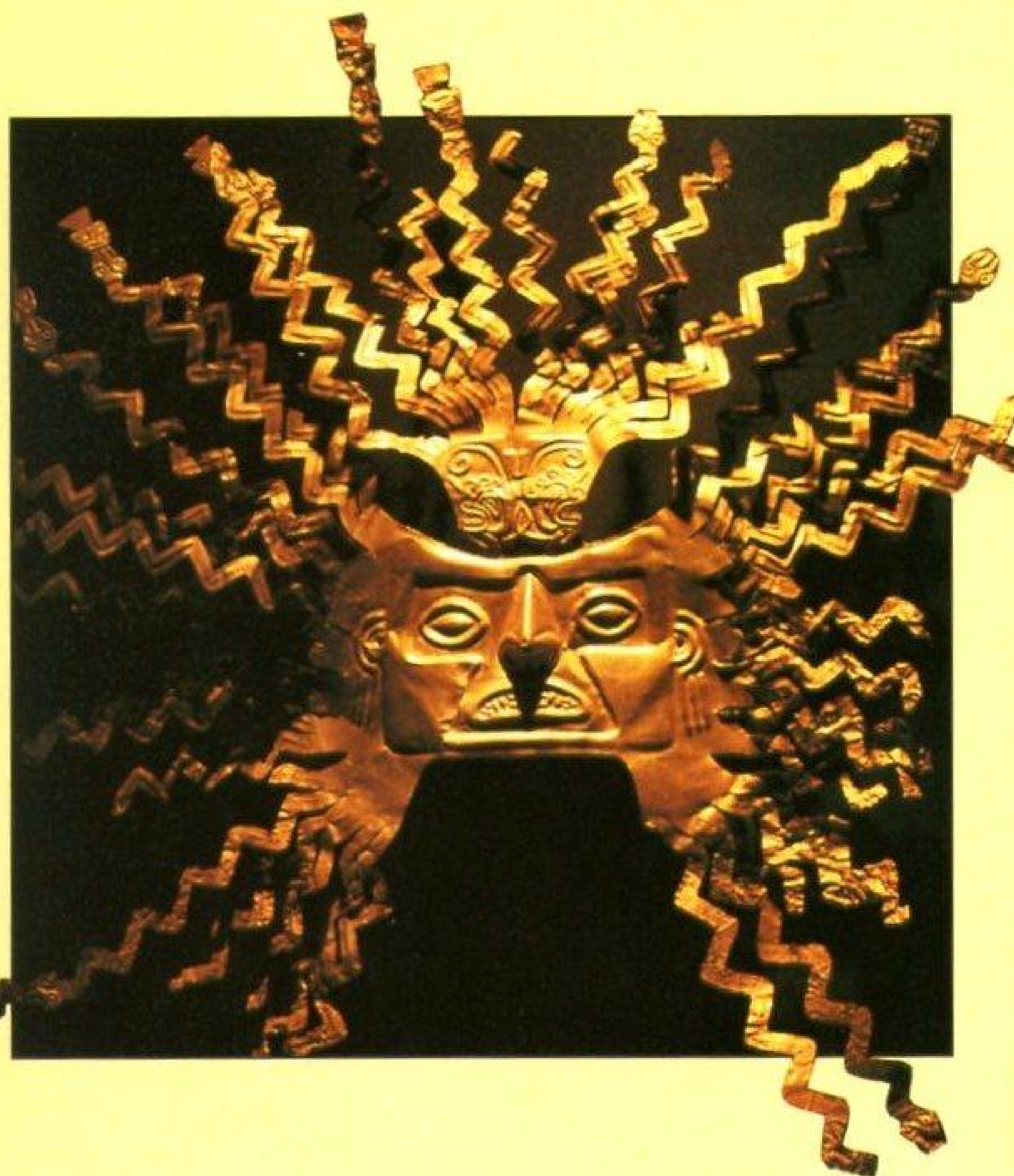
Los adoradores del sol

En casi todos los mitos de creación del mundo, el sol aparece como protagonista. Y en culturas tan diferentes como la de los celtas de Gran Bretaña y la Galia y la de los aborígenes de Australia, se adoraba al sol como si fuera un dios.

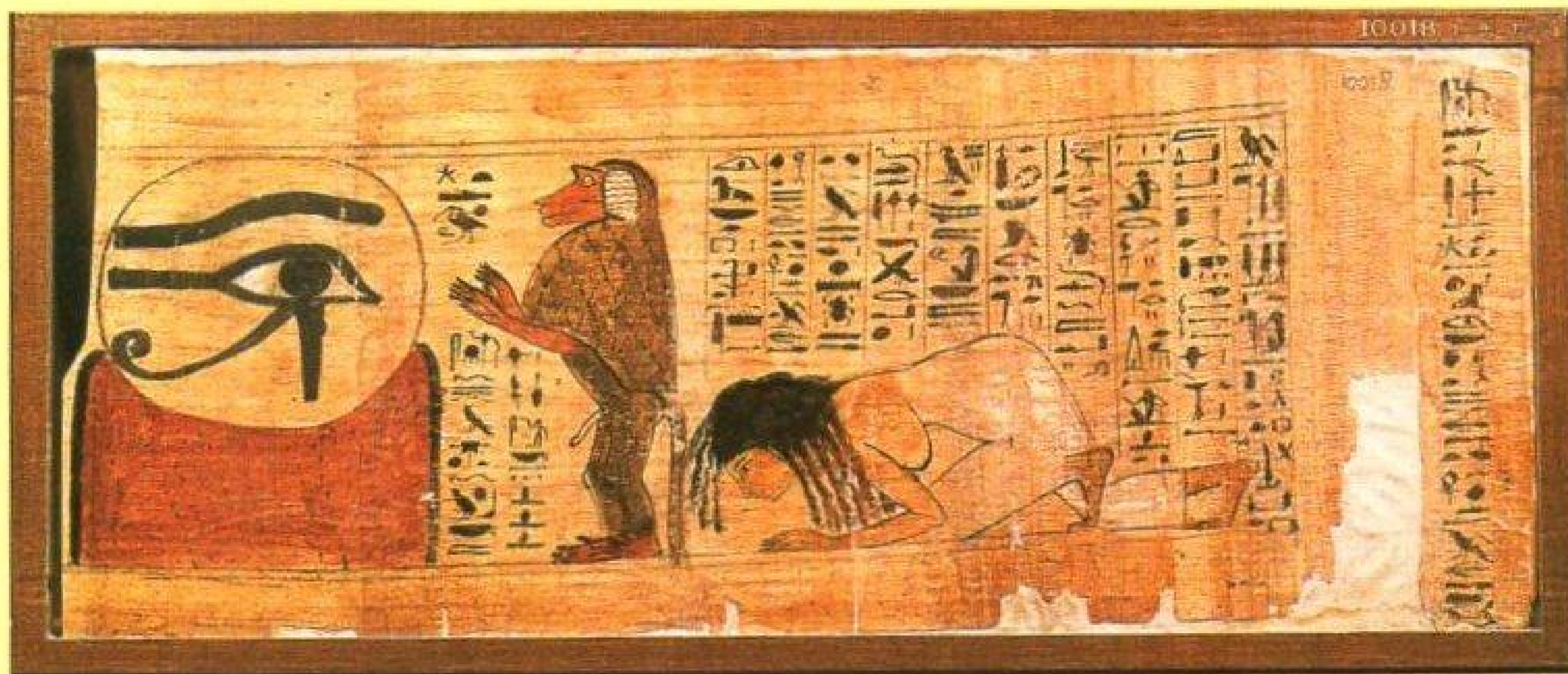
Las antiguas leyendas egipcias sobre la creación combinan un gran número de estos elementos míticos. El dios del sol era Ra, cuyo nombre significaba «creador y señor de los cielos». Se lo veneraba por encima de todos los demás dioses, y a lo largo de los siglos tuvo varias manifestaciones, entre ellas el halcón, el león y el disco solar. La raza humana se creó a partir de las lágrimas del gran Ra, los faraones se consideraban descendientes del dios, y entre su descendencia divina figuraban Shu —el Atlas de la mitología egipcia—, el dios de la tierra, Geb, y su esposa Nut, la diosa del cielo. Este es el trío protagonista de la historia de la creación.

Cuando Geb y su esposa se encontraban haciendo el amor, Shu los obligó a separarse. Nut quedó arriba, formando el cielo, y Geb abajo, donde creó la tierra. A Nut se la solía representar con figura femenina y alargada, tocando la tierra con las puntas de los dedos de pies y manos, y con su vientre estrellado de cara a la tierra. En una época en la que resultaba imposible obtener informaciones verídicas sobre el origen de la Tierra, estos mitos proporcionaban una explicación coherente y que inspiraba reverencia.

Miles de años después, los conquistadores españoles que llegaron a América en el siglo XVI descubrieron que el culto al sol aún formaba parte integrante de las religiones inca y maya. Los incas creían que Inti, el dios del sol, se zambullía en el mar cada tarde, nadaba bajo la tierra y reaparecía por el este a la mañana siguiente.



Esta magnífica máscara de oro, con llamas irradiando de la cara, representa al dios inca del sol. También los mayas adoraban al sol, y sus sacerdotes estaban versados en la observación astronómica. En la ciudad de Chichén Itzá, México, cuatro escalinatas de 365 escalones cada una —uno por cada día del año— conducían a lo alto de la pirámide que los españoles llamaron el Castillo.



En el antiquísimo Libro egipcio de los muertos aparece una sacerdotisa de Ra en compañía de Hapi, un dios con cabeza de mono, encargado de vigilar una urna funeraria. Ambos adoran al disco solar, que contiene el ojo de Ra.

catalizadores de la fusión del hidrógeno y se repondrían a sí mismos. En esta teoría se basa el concepto moderno de la producción de energía estelar.

Esta hipótesis sobre la dinámica solar va acompañada de un concepto de su organización interna, algo que jamás se puede percibir directamente. En lo más profundo de la masa solar hay un núcleo de hidrógeno en fusión, en condiciones de temperatura y presión elevadísimas. En él, los núcleos de átomos de hidrógeno se apretujan a 15 millones de grados centígrados, formando un material doce veces más denso que el plomo. En estas condiciones de altísima energía, se produce una explosión constante de lo que equivale a una inmensa bomba de hidrógeno controlada.

La energía emitida desde el núcleo se abre camino por radiación hasta la superficie del sol, la llamada zona de convección externa, que tiene unos 100.000 kilómetros de espesor. Desde aquí hacia fuera, la mayor parte de la energía se transfiere mediante violentas agitaciones convectivas de los gases. La parte visible del sol, su superficie exterior y brillante, es la llamada fotosfera, con una temperatura de unos 6.000 °C. Más hacia fuera se encuentra la atmósfera tenue del sol, o corona solar, mucho menos densa, donde se origina el «viento solar» de partículas energéticas, que fluye de manera constante.

La forma esférica del sol y su superficie radiante y aparentemente regular se ven perturbadas por una serie de fenómenos, muchos de ellos de carácter rítmico y relacionados con sus propiedades magnéticas. De vez en cuando, surgen de la superficie solar enormes llamaradas y prominencias, y también aparecen manchas oscuras y relativamente frías, que se desplazan por la superfi-



cie y acaban finalmente desapareciendo.

A lo largo de los años, se puede observar que el número de manchas solares aumenta y disminuye siguiendo un ciclo de once años, que a su vez guarda relación con el ciclo —de veintidós años— de inversiones de polaridad en el campo magnético del sol. Se han realizado muchos intentos de encontrar correlaciones de este ciclo en la Tierra —en el clima, la conducta humana o los momentos críticos de la historia— y parece demostrado que algunos fenómenos meteorológicos siguen la misma pauta. Pero lo más probable es que no guarden relación directa con las manchas solares, sino más bien con el aumento de actividad del viento solar, que a su vez depende de los ciclos magnéticos del sol.

La posición cósmica de la Tierra en relación con el sol y otros cuerpos celestes ha constituido siempre un profundo misterio. La historia de las sucesivas interpretaciones es un fascinante despliegue de grandes inspiraciones, largos períodos de confusión, pasos en falso y, con el tiempo, una especie de consenso en torno a una imagen clara pero intimidante de nuestras coordenadas cosmológicas.

No resulta difícil imaginar cómo surgió la idea de una tierra plana e inmóvil; para el observador casual, en la experiencia cotidiana no existe nada que refute este concepto, directo y aparentemente razonable. El propio Tales de Mileto, filósofo griego que vivió más de cinco siglos antes de Jesucristo, creía que el mundo era un disco plano que flotaba en el agua, y su teoría sólo se puso en duda cuando resultó evidente que algunas observaciones astronómicas eran incompatibles con esta visión simplista del mundo.

Algunas estrellas concretas, muy brillan-

tes y fáciles de identificar, se podían ver, en ciertas épocas del año, en algunas partes del mundo entonces conocido, pero no en otras. Por ejemplo, Canope se veía desde Alejandría, en el norte de África, pero nunca desde Atenas. La única explicación posible era que la superficie de la Tierra fuese curva, con lo que, vista desde la Grecia continental, Canope quedaba siempre detrás del horizonte.

Dado que los griegos tenían un concepto místico de la esfera, que consideraban como la forma sólida perfecta, parece natural que desarrollaran la idea de una superficie curva hasta llegar al concepto de un mundo esférico; para la humanidad, esto representó un enorme salto mental.

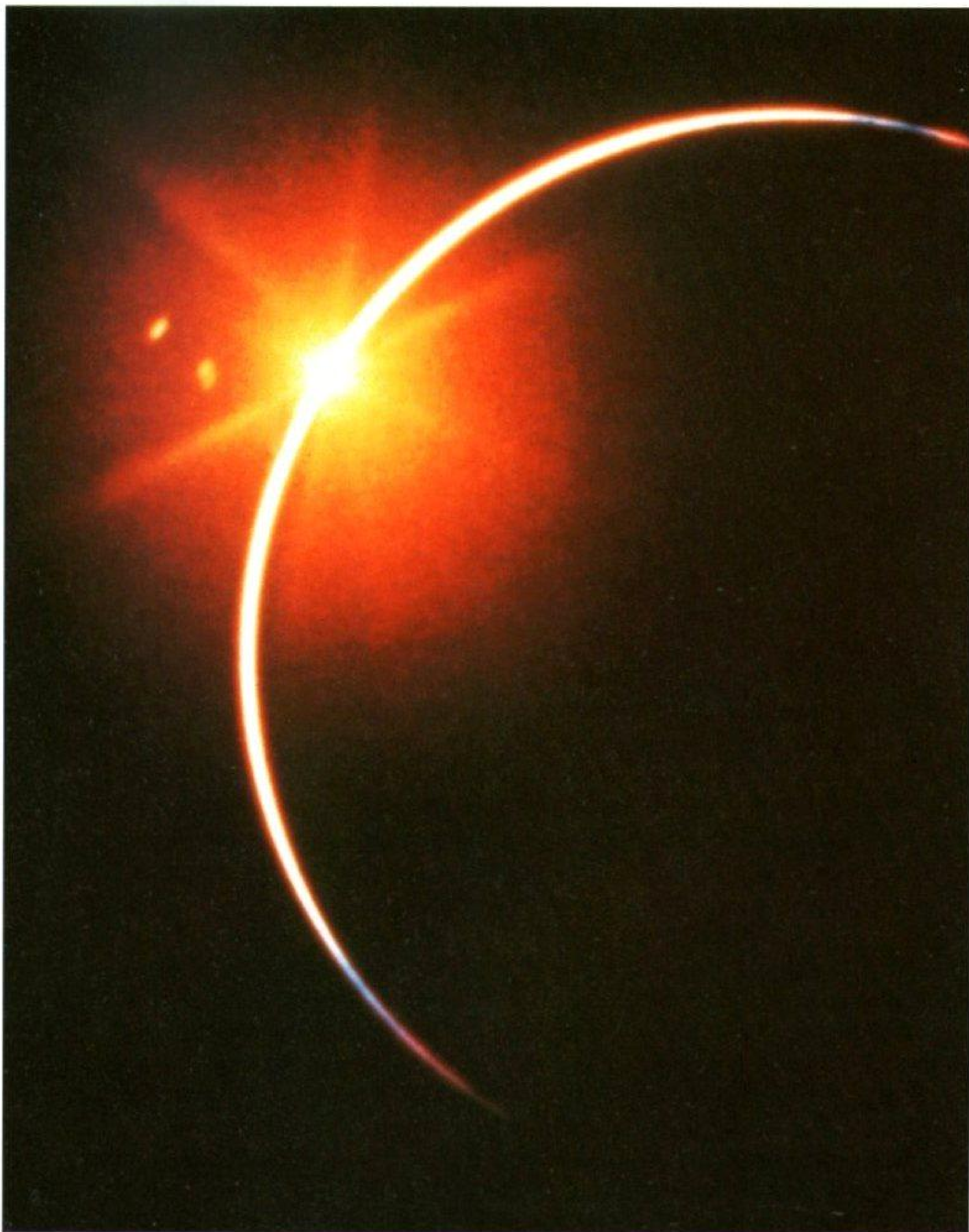
El modelo esférico de la Tierra poseía la virtud adicional de explicar por qué la sombra de la Tierra, causa de los eclipses y solsticios, era también circular. Hace ya 41 siglos, los habitantes de la Tierra seguían los ciclos periódicos de eclipses y solsticios. Un pueblo neolítico, por ejemplo, levantó el fascinante monumento megalítico de Stonehenge en la llanura de Salisbury, al sur de Inglaterra, que, según parece, no sólo servía como templo sino también como calendario astronómico. Es casi seguro que observando el sol y la luna a través de los complicados anillos de piedras cuidadosamente colocadas se podían predecir los eclipses.

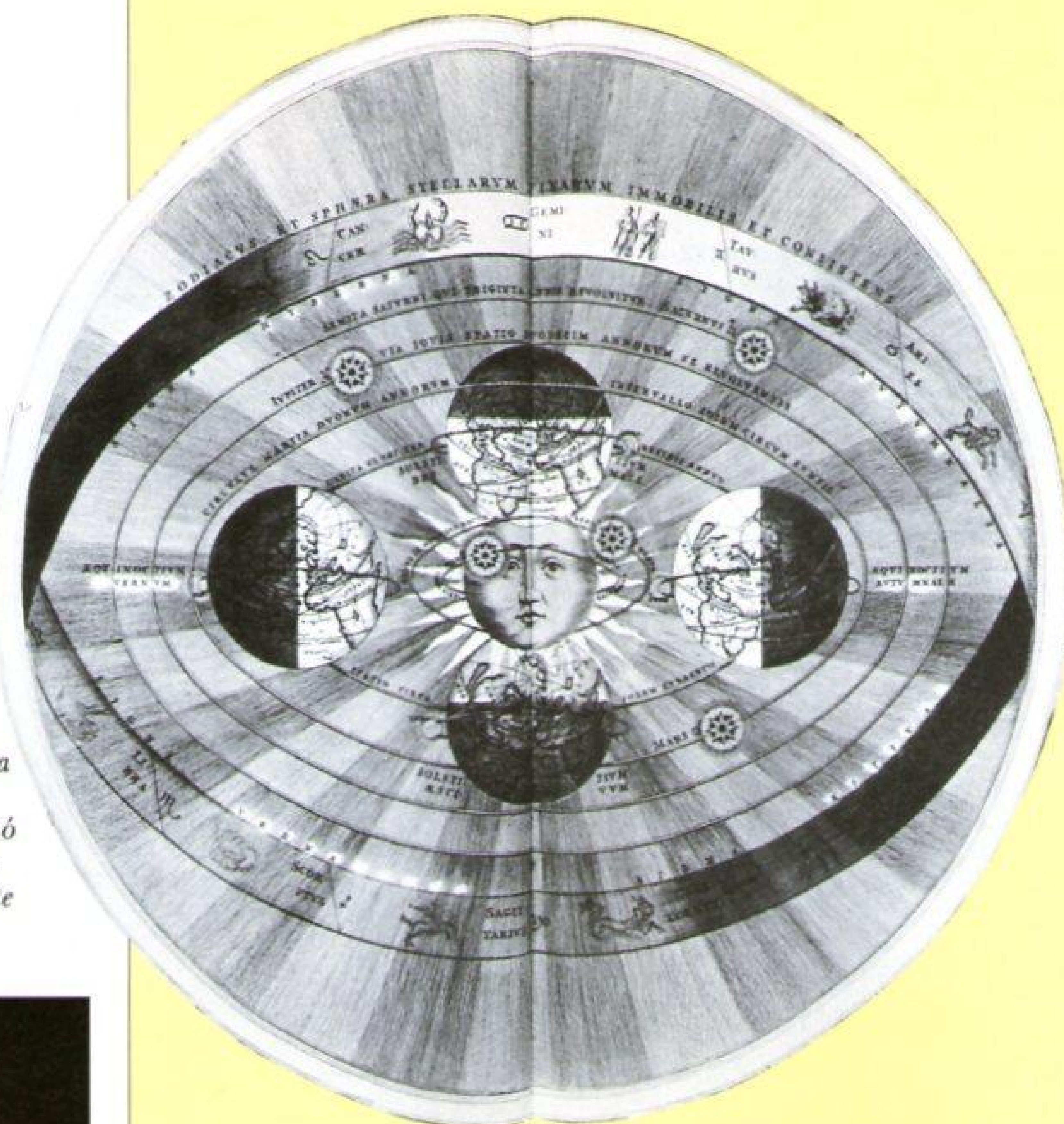
Pero a pesar de que el concepto de un mundo esférico seguía ganando adeptos, a algunos pensadores y filósofos aún les resultaba difícil no caer en el más tenaz de los prejuicios: el de creer que los seres humanos, y el mundo en que vivimos, ocupamos el centro del universo. Los griegos clásicos estaban convencidos de que el sol, la luna y las estrellas giraban alrededor de una Tierra fija, en trayectorias circulares; ésta es la teoría de las esferas celestes.

No resultaba tan fácil explicar los movimientos de los planetas (en griego *planaomai* o «cuerpos errantes»), porque sus trayectorias parecían irregulares en relación con las posiciones «fijas» de las estrellas. Pero el ingenio de los griegos logró superar esta dificultad, elaborando una teoría, el llamado sistema tolomeico, que codificaba las trayectorias de los planetas mediante un sistema de círculos dentro de otros círculos: los llamados epiciclos. Mediante esta especie de engranaje cosmológico se podían predecir de manera aproximada los movimientos de los planetas y las estrellas.

Sin embargo, algunos griegos, los inconformistas intelectuales de la época, se negaban a aceptar la idea ortodoxa de la Tierra como centro del universo. Aristarco de Samos fue el primero en sugerir, hacia el 250 a. C., que la Tierra se movía alrededor del sol en una órbita circular que tardaba un año en completarse. Llegó, además, a la conclusión de que el sol era más grande que la Tierra, y que la rotación de ésta sobre su eje era la causa de los días y las noches. Pero tanta perspicacia sólo le sirvió para ser considerado un excéntrico con delirios.

Habría que esperar casi 1.800 años, hasta 1530, para que sus ideas fueran recogidas y replanteadas por un clérigo polaco llamado Nicolás Copérnico (1473-1543). Su concepto de un universo heliocéntrico se enfrentó de manera inmediata con la violenta oposición de la Iglesia. Martín Lutero, jefe de la Reforma Prostestante, declaró a propósito de Copérnico: «Este idiota está tratando de echar por tierra todo el arte de la astronomía.» Y así era, en realidad. Copérnico había provocado una grieta irreparable en el edificio del sistema tolomeico, cuya destrucción era ya inevitable.





En la Harmonia Macrocosmica de *Andreas Cellarius, publicada en* Amsterdan en *1708, se representa de forma imaginativa el sistema copernicano del Universo.*
La Tierra, que gira en torno a un sol de expresión benigna, aparece en cuatro fases de día y noche. Los demás planetas giran cada uno en su órbita, y en la eclíptica —el recorrido aparente del sol a través de los cielos— están representados los doce signos del Zodíaco.

Eclipse solar: esta impresionante fotografía se tomó en 1969 desde la Apolo XII, durante un viaje a la luna.

Los primeros astrónomos

El tratado de Nicolás Copérnico *Sobre las revoluciones de los orbes celestes,* publicado en 1543, estableció las bases de toda la astronomía moderna. Sin embargo, su autor creía erróneamente que las órbitas de los planetas eran circulares.

Tal hipótesis fue refutada por el alemán Johannes Kepler (1571-1642), quien descubrió que eran elípticas.

La invención del telescopio permitió al astrónomo italiano Galileo (1564-1642) descubrir, entre otras cosas, los cráteres y montañas de la luna. Issac Newton (1643-1727) construyó el primer telescopio de espejo; y en 1789, William Herschel (1738-1822), que ya había descubierto el planeta Urano, terminó de construir su telescopio de 12,2 m, un gigantesco instrumento con el que escudriñó los cielos, logrando penetrar mucho más allá del sistema solar.

Los fantásticos experimentos de la época moderna, como la sonda espacial Voyager 2, dirigida a Neptuno, son la continuación del trabajo de aquellos pioneros.



Esta xilografía, que representa a un hombre atravesando la bóveda del cielo para investigar sus misterios, describe muy gráficamente la excitación que provocaron las ideas de Copérnico entre los astrónomos y eruditos.

Un imán colosal

Para la mayoría de nosotros, por un lado existe la ciencia de sentido común y por otro la ciencia misteriosa. La ciencia de sentido común se aplica a las expectativas normales de la experiencia cotidiana, y nos damos por satisfechos con tener una idea de los mecanismos que hacen que sucedan las cosas. No nos sorprende que una llama caliente el agua de una olla, ni que al añadir agua fría al agua caliente obtengamos un volumen doble de agua templada.

La ciencia misteriosa se ocupa de procesos que no parecen tener cabida en nuestro mundo cotidiano y bien ordenado. Podemos prescindir tranquilamente de los misterios localizados al nivel de la física cuántica, que trata de extrañas incertidumbres en un plano de existencia en el que la materia y la energía se presentan en cantidades infinitesimales e impredecibles. Los cuantos no se entrometen en nuestros asuntos cotidianos.

Sin embargo, el magnetismo es otra cuestión. Parece de lo más corriente, algo que se da siempre por sentado. Por muy poco dinero se pueden comprar juguetes que fun-

Con una precisión verdaderamente asombrosa, las aves migratorias como la barnacla cariblanca regresan año tras año a los mismos lugares. Parece que navegan guiándose por el sol y las estrellas, por marcas del paisaje y por el campo magnético de la Tierra, que los humanos apenas percibimos. Aunque somos incapaces de comprender este talento innato, lo hemos aprovechado para enviar mensajes en tiempo de guerra, cuando no es posible utilizar otra forma de comunicación. Abajo: palomas mensajeras aguardando a que las suelten para participar en una competición.





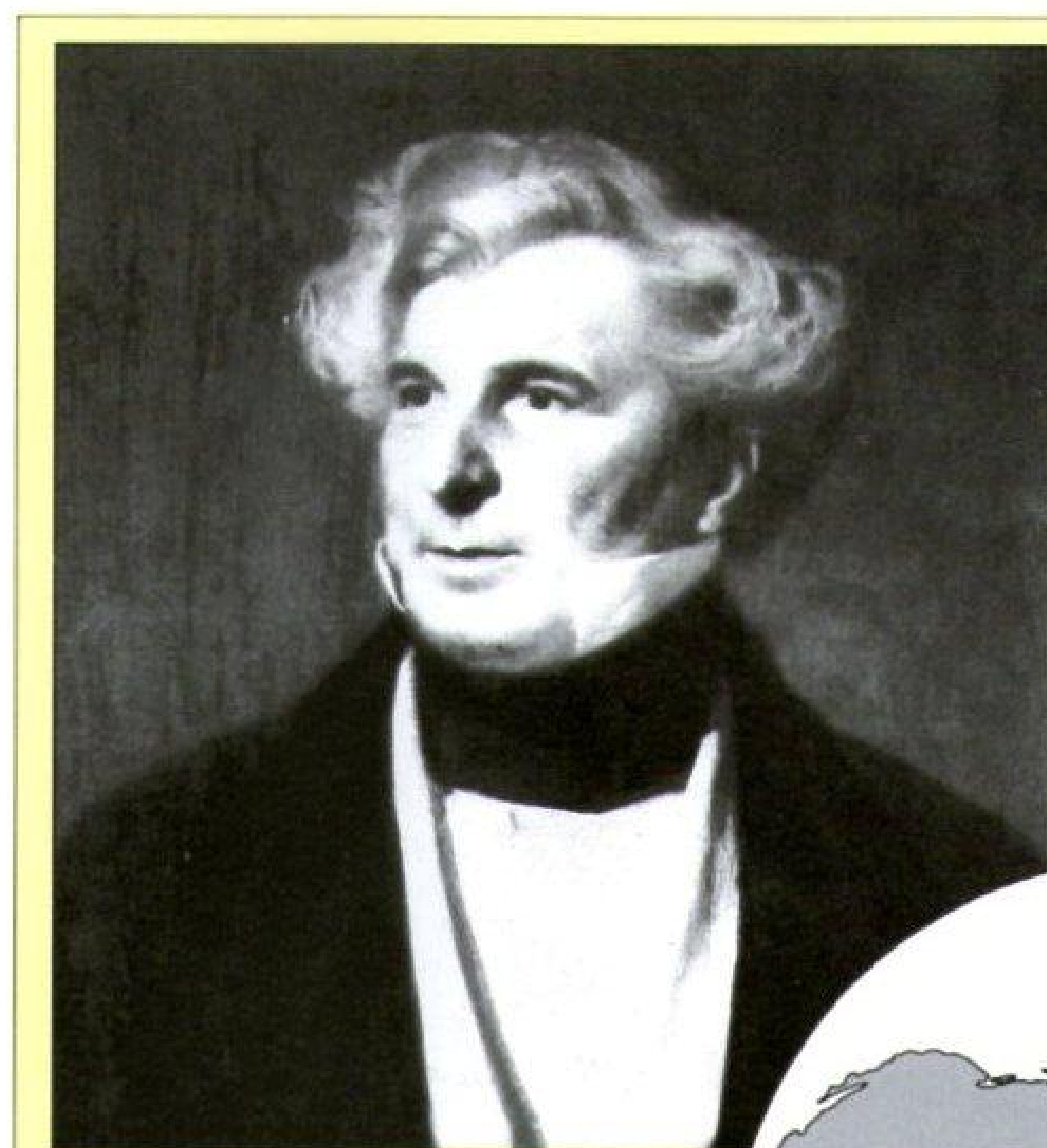
cionan a base de pequeños imanes que se repelen; la brújula con aguja magnética ha sido un artefacto de uso común —y fundamental— en casi todas las sociedades tecnológicas. Pero si nos paramos a pensar en ellos, tanto los juguetes como la brújula pueden resultar terroríficos. La capacidad de un imán para mover otro, sin que exista contacto físico entre ellos, parece cosa de magia.

Los misteriosos poderes del electromagnetismo, mezcla de influencias eléctricas y magnéticas permanentemente entrelazadas, tienen una importancia fundamental. Es la atracción electromagnética, es decir, la atracción entre la carga positiva y la negativa o entre un polo «norte» y otro «sur», lo que hace funcionar un motor eléctrico o una central de energía. La misma atracción, en una escala increíblemente más pequeña, es lo que mantiene la estructura de los átomos.

Cada átomo está organizado como un sistema solar en miniatura. El «sol» de este sistema es el núcleo del átomo, que contiene casi toda su masa y está cargado positivamente. Alrededor del núcleo giran electrones con carga negativa, mantenidos en sus distintas «órbitas» por fuerzas electromagnéticas. Sin esta atracción, que mantiene unidos los componentes del átomo, éste no podría existir. Y sin los átomos, no existirían los planetas, las estrellas ni los seres humanos.

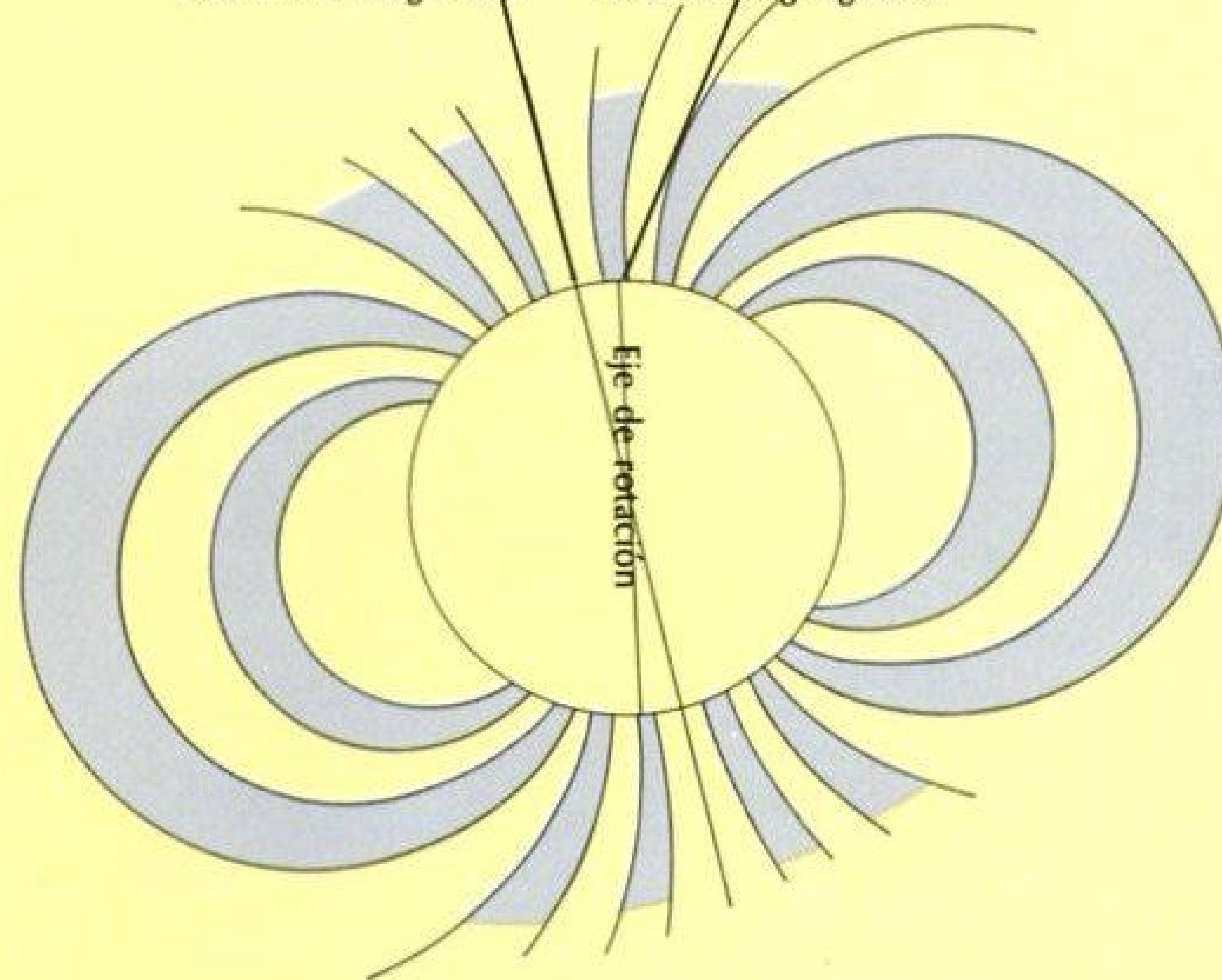
Nuestro planeta posee un magnetismo significativo, como lo demuestra el hecho de que la aguja de la brújula se oriente siguiendo el campo magnético de la Tierra. En el hemisferio norte, la aguja señala al polo magnético norte; en el hemisferio sur, a su equivalente del sur. En términos magnéticos, la Tierra se comporta casi como si tuviera una gigantesca barra imantada atravesándola de parte a parte, con un extremo en cada polo. Cada polo magnético se encuentra desplazado unos once grados con respecto a los verdaderos polos geográficos, definidos por el eje sobre el que rota la Tierra.

Entre los dos polos magnéticos se extienden las invisibles líneas de fuerza del campo magnético terrestre. Este campo de fuerza forma una especie de plantilla cartográfica sobre el paisaje, que sirve de orientación a los seres vivos capaces de percibir su fuerza y su dirección. Los científicos están empezando a darse cuenta de lo extendido que está el sentido magnético en los seres vivos. Las bacterias, los peces, las aves y quizá también las personas derivan parte de su capacidad para mantener un rumbo de su capacidad para sentir la dirección del campo magnético de la Tierra. Y se cree que los zahoríes, personas dotadas del misterioso poder de localizar sustancias bajo la tierra valiéndose tan sólo de un palo ahorquillado, son sensibles a las pequeñas variaciones electromagnéticas producidas por el agua o los minerales del subsuelo.



Sir James Clark Ross (1800-1862) localizó en 1831 el polo norte magnético, en colaboración con su tío John Ross. En 1839 encabezó una expedición a la Antártida que llegó más al sur que ninguna otra, aunque no logró localizar el polo magnético sur. El mar de Ross recibió su nombre en honor suyo.





El campo magnético de la Tierra es muy similar al generado por un imán dipolar, pero está muy distorsionado por el viento solar, que le hace adoptar forma de lágrima (a la derecha). El eje magnético forma un ángulo de 11° con el eje de rotación de la Tierra, de manera que los polos geográficos no coinciden con los magnéticos. Además, la posición de los polos magnéticos varía, siguiendo trayectorias circulares de unos 160 km de diámetro. En la actualidad, el polo magnético norte está situado a 79°N, 70°O, al noroeste de Thule, Groenlandia (arriba, derecha).

Los investigadores aún no tienen más que una idea muy vaga sobre la verdadera fuente del magnetismo terrestre. El hecho de que varíe en intensidad y dirección de año en año y de milenio en milenio parece indicar que no puede deberse a una estructura magnética rígida situada en las entra-

La magnetosfera

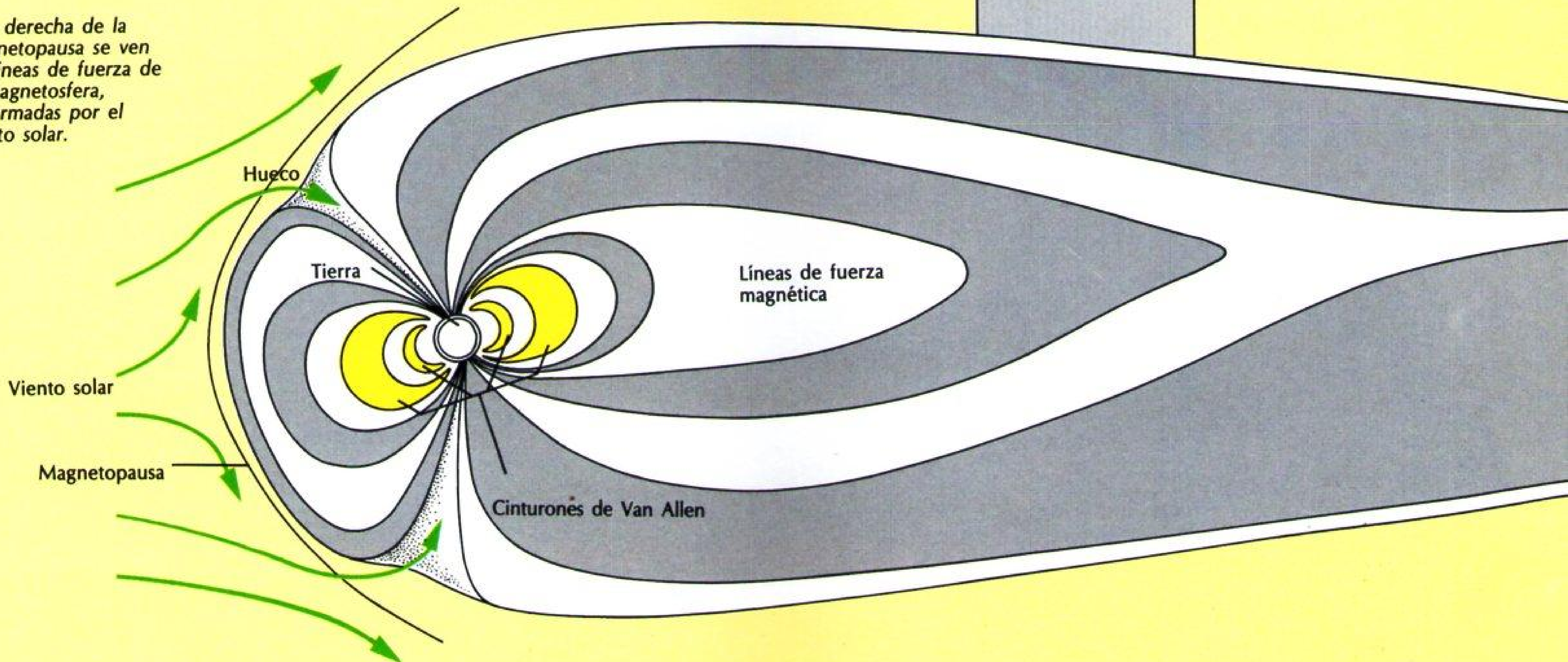
El campo magnético de la Tierra se extiende por el espacio, con un radio muchas veces superior al del planeta. No presenta la típica forma simétrica de rosquilla (toroide) que genera un simple imán de barra, porque está distorsionado por el viento solar, el incesante chorro de partículas cargadas que emana del Sol, que comprime el campo por el lado más cercano al Sol y lo alarga muchísimo por el lado opuesto. El resultado es un campo magnético «estirado», en forma de lágrima, con la cola alejándose del Sol.

A este campo se lo denomina «magnetosfera terrestre», aunque su forma dista mucho de ser esférica, y a sus límites se los llama magnetopausa. Por el lado del Sol, estos límites de la influencia magnética terrestre se encuentran a sólo 60.000 km, pero por el lado opuesto se alejan hasta 400.000 km de distancia.

La enorme velocidad de las partículas cargadas que forman el viento solar, que puede llegar a los 1.000 km por segundo, provoca una especie de onda magnética de choque, parecida a la onda de proa de un barco, en la magnetopausa del lado más próximo al sol.

El campo magnético de la Tierra actúa como una especie de trampa para algunas partículas cargadas procedentes del sol y para otras procedentes del espacio interestelar, como los rayos cósmicos. Las partículas con carga quedan atrapadas en dos cinturones que rodean el planeta, uno situado entre 1.000 y 5.000 km, y el otro entre 15.000 y 20.000 km sobre la superficie de la Tierra. La presencia de estas zonas, llamadas «cinturones de radiación de Van Allen» en honor del científico norteamericano que las descubrió, se determinó en 1958 por medio de contadores Geiger instalados a bordo del primer satélite norteamericano, el Explorer I.

El campo magnético terrestre se ha invertido varias veces, de norte a sur y viceversa, como lo demuestra el estudio del magnetismo en rocas formadas durante los últimos 45 millones de años. La alternancia de franjas blancas y grises ilustra las numerosas inversiones que han tenido lugar durante este período.



A la derecha de la magnetopausa se ven las líneas de fuerza de la magnetosfera, deformadas por el viento solar.

ñas de la Tierra. Lo más probable —aunque de momento no se trata más que de especulaciones bien fundadas— es que el magnetismo se genere de algún modo por los constantes movimientos, inducidos por el calor, de los minerales de hierro situados en el núcleo del planeta o muy cerca de él.

El núcleo de la Tierra mide aproximadamente 3.600 km de diámetro, y está formado por una región central sólida y una zona externa que parece ser fluida. El hierro que forma parte del contenido metálico del núcleo es un buen conductor de la electricidad, y las corrientes eléctricas en un conductor producen siempre un campo magnético; y a la inversa, cuando un conductor se mueve en un campo magnético, se crea una corriente inducida. Esta hermosa simetría de interacciones entre corriente, movimiento y magnetismo permite explicar que el núcleo sea capaz de mantener el campo magnético del planeta.

A esto se le llama «teoría de la dinamo autoexcitada». Si el hierro fluido del núcleo, que se encuentra en constante movimiento por efecto del calor, se encuentra con un ligero magnetismo, se generará una corriente en el metal en movimiento. A su vez, la corriente generará un campo magnético que estimulará aún más la corriente. Se

trata de un sistema de retroalimentación positiva que se mantiene a sí mismo. Y si la convección calórica mantiene el metal en perpetua circulación, es posible concebir un campo magnético perpetuo. Lo único que hace falta para poner en marcha este proceso es una magnetización inicial. Y dado que tanto el níquel como el hierro del núcleo terrestre se pueden magnetizar con facilidad, no resulta difícil imaginar algún magnetismo fundamental en el núcleo sólido, que inicie el proceso autogenerador en el núcleo fluido, en constante movimiento.

Sin duda alguna, la principal aplicación humana del magnetismo terrestre ha sido el empleo de la brújula magnética para la navegación a largas distancias. Una aguja magnetizada, capaz de girar con libertad, se alinea con el campo magnético de la Tierra, y en el hemisferio norte señalará al polo magnético norte.

La posibilidad de fijar un rumbo en alta mar o en un territorio sin puntos de referencia confiere una gran ventaja, aprovechada por todos los pueblos marineros desde la antigüedad. Los antiguos griegos conocían ya las extrañas propiedades de la «piedra imán» o magnetita, un mineral magnético formado principalmente por compuestos de hierro, pero probablemente fueron los chinos, en el siglo I a. C., los primeros en construir una brújula con magnetita.

Sin embargo, la brújula, en último término, sólo responde a las líneas de fuerza magnética, y éstas, por desgracia, no son las mismas en todo el mundo. Entre otras cosas, en cualquier punto de la superficie terrestre hay que tener en cuenta el problema de la discrepancia entre el norte magnético y el norte geográfico o «auténtico». Esta desviación varía de manera muy complicada, y sólo si se conocen las pautas de variación se puede interpretar con certeza la lectura de la brújula.

En el Reino Unido, por ejemplo, el norte de la brújula se encuentra a unos diez grados al oeste del norte verdadero, mientras que en el centro del Mediterráneo la discrepancia es casi nula. Cuanto más nos acerquemos a los polos magnéticos, mayor será la desviación de la aguja, al este o al oeste del verdadero polo. Esto ha planteado siempre grandes problemas a los exploradores polares.

Y no es sólo que la desviación varíe según la posición geográfica; además, la posición de los polos magnéticos varía con el tiempo, lo mismo que la intensidad del campo. Estos complicados cambios obligan a poner al día periódicamente las cartas de navegación, con respecto al polo magnético norte, para impedir que se acumulen las inexactitudes.

Estos aspectos prácticos del magnetismo terrestre dan a entender una profunda verdad acerca del fenómeno mismo. Las líneas de fuerza no definen, ni mucho menos, una plantilla estática de líneas de orientación, similar a la de un atlas escolar. Por el contrario, el magnetismo de la Tierra es una entidad dinámica, tan «constante» e «inalterable» como el clima, el paisaje o las posiciones de los continentes a la deriva. Si consideramos intervalos de tiempo muy largos, se observa una extraordinaria variación, relacionada con la deriva continental y demostrada por el paleomagnetismo, o magnetismo residual en rocas de épocas remotas.

Cuando la roca fundida empieza a solidificarse, las pequeñas partículas magnéticas contenidas en su interior se alinean con el campo magnético existente, orientándose hacia el polo magnético norte o sur. El estudio de rocas que se solidificaron durante los últimos 50 millones de años demuestra que a intervalos irregulares, con cientos de miles de años de diferencia entre unos y otros, la polaridad magnética de la Tierra se ha invertido de manera inexplicable: el polo magnético norte se convirtió en sur, y viceversa.

Este asombroso cambio es la mejor prueba posible del dinamismo misterioso del magnetismo terrestre.



Arriba: magnetita montada en latón (finales del siglo XVII). A la derecha: esfera geomántica china.

La invención de la brújula

El descubrimiento de las propiedades magnéticas de la magnetita o piedra imán y la invención de la brújula de navegación permitieron a los marinos embarcarse en viajes cada vez más largos y ambiciosos.

Un fragmento de magnetita suspendido en equilibrio se orienta más o menos en dirección norte-sur, con el mismo extremo apuntando siempre al norte.

Los antiguos chinos ya utilizaban «brújulas» de magnetita, pero no para la navegación, sino para la geomancia, una forma de adivinación en la que una aguja magnética giratoria señala predicciones ordenadas alrededor

Sir Francis Drake, corsario al servicio de la reina Isabel de Inglaterra, fue uno de los primeros navegantes que dieron la vuelta al mundo por el cabo de Hornos, las Indias Orientales y el cabo de Buena Esperanza. Como se aprecia en esta reproducción de su barco, el Golden Hind, *de 100 toneladas y 100 metros de eslora, se trataba de un navío pequeño en comparación con los buques modernos, pero contaba con los últimos adelantos en instrumentos de navegación, y su capitán tenía una sed de aventuras y riquezas que le dio fuerzas para regresar al puerto de partida en 1580, tras una travesía de tres años.*

de ella. El norte estaba marcado por un trigrama de tres líneas partidas en el círculo interior, y el sur se hallaba situado en la parte alta de la brújula, al contrario de lo que hacemos nosotros.

Poco a poco, las brújulas se fueron perfeccionando.

Aprendimos a magnetizar agujas de hierro, que podían moverse con más facilidad para señalar los polos magnéticos norte y sur, a equilibrarlas con exactitud, a protegerlas del viento y, por último, a colocarlas flotando en un líquido para eliminar las vibraciones y obtener una indicación clara y precisa.



Esta combinación de instrumentos de navegación en latón dorado, construida en 1569 por Humphrey Cole, perteneció probablemente a Francis Drake. El conjunto, de forma ligeramente ovalada, sólo mide 65 mm, pero incluye una esfera equinoccial universal, una tabla de latitudes, una tabla de mareas, brújula, calendarioo perpetuo y una esfera que indica las fases de la luna.

Las luces del norte

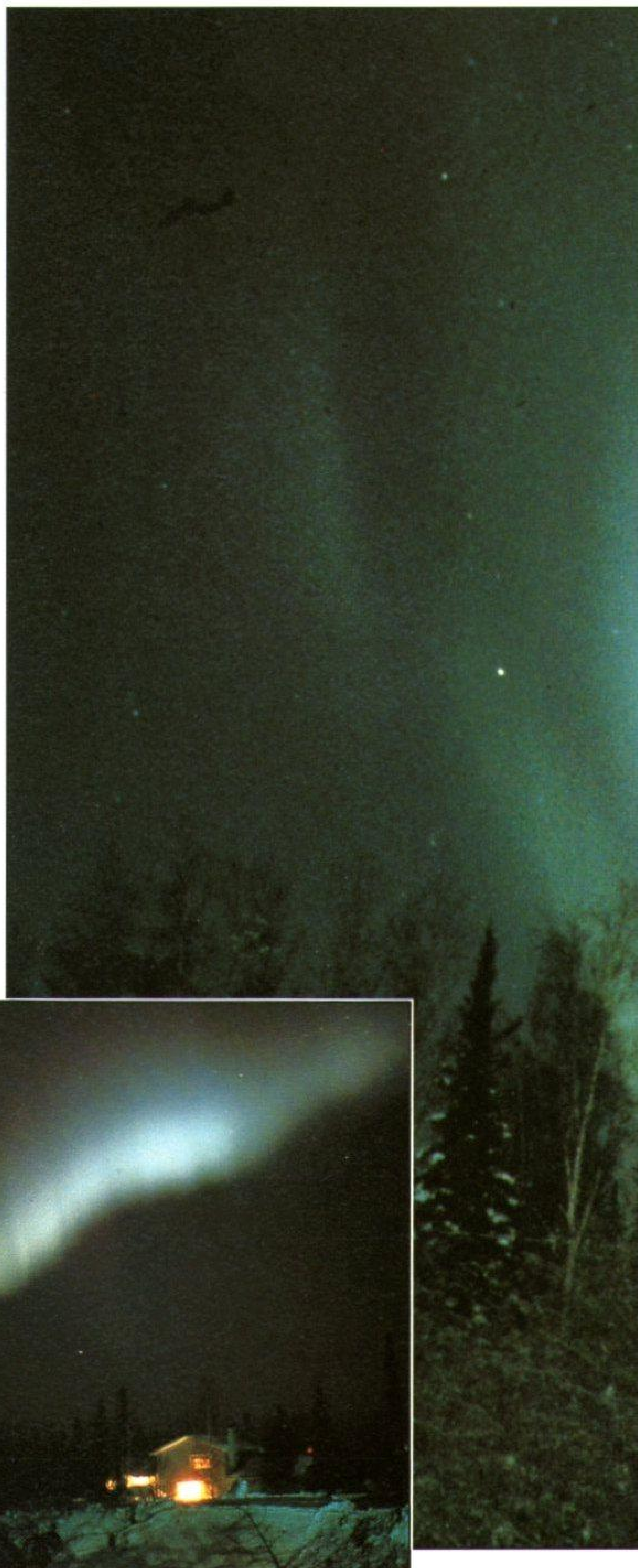
Las luces de la aurora boreal constituyen uno de los espectáculos naturales más grandiosos que puede percibir la vista humana. Las tinieblas de la noche polar se ven surcadas por deslumbrantes arcos y franjas de luz violeta y azulada; relámpagos verdes con las puntas rojas atraviesan el cielo; y exquisitos tapices blancos, con estructuras increíblemente intrincadas, evolucionan y se funden unos con otros varias veces por minuto. Y al mismo tiempo, focos de luz pulsátil crean una visión de belleza comparable a la de una espléndida puesta de sol, pero en constante movimiento.

Aunque sus causas están ya bastante bien explicadas, la aurora boreal permaneció durante muchos siglos entre las curiosidades científicas, y su existencia aún sigue rodeada de fascinantes misterios. A diferencia del arco iris, cuya posición parece cambiar según donde se encuentre el observador, la aurora siempre se forma en lugares concretos de la atmósfera superior, con apariencia de arcos llameantes. Pero su curiosa luz ultraterrenal no se debe a ningún fuego, sino que se asemeja más al resplandor de unas decargas eléctricas bajo una luz fluorescente.

Las auroras, tanto la boreal como la austral, suelen producirse en dos franjas que rodean, respectivamente, los polos norte y sur, y por lo general se desplazan de oeste a este. El hecho de que sean casi perpendiculares a la dirección de la aguja de la brújula permite suponer una relación con el campo magnético terrestre.

Los cielos árticos, y sobre todo en el norte de Canadá, Alaska, Noruega y Spitzbergen, son el escenario más frecuente de estas magníficas exhibiciones, ya que son mucho más oscuros y despejados que los cielos de las regiones más pobladas de Europa. La mejor época para observar la aurora boreal es en febrero, cuando las zonas de altas presiones barométricas permanecen estacionarias sobre la región polar durante semanas enteras.

Durante este período, se pueden ver auroras casi todas las noches despejadas, aunque cuando hay luna resultan mucho menos



El poeta norteamericano Bayard Taylor expresó en 1864, de manera incomparable, la caprichosa belleza de una aurora boreal: «una amplia cortina de luz que cae de golpe hasta que su borde queda a unos pocos metros de nuestras cabezas... colgada a plomo del cenit, a lo largo de lo que parecen millones de leguas de aire, formando pliegues entre las estrellas y con un bordado de llamas que barren la tierra y emiten una pálida y extraterrenal radiación sobre las soledades cubiertas de nieve».



espectaculares. A través de la luz de la aurora se pueden divisar las estrellas más brillantes, pero cuando el fenómeno es más intenso produce luz suficiente como para leer.

Por lo general, la aurora aparece como una larga franja o cortina ondulada, aunque a veces no se ve más que una masa difusa y sin forma, pero luminosa. Si la aurora está casi encima, la «cortina» se ve de canto, y entonces se aprecia que es muy fina y muy alta: en ocasiones, se prolonga hacia arriba hasta alturas de 650-800 km, aunque hay auroras que sólo miden de 32 a 48 km de altura.

Las auroras más altas suelen producirse en las capas de la atmósfera expuestas a los rayos del sol, aunque el sol se encuentre debajo del horizonte. Debido a la curvatura de la Tierra, las auroras que parecen estar a poca altura sobre el horizonte se encuentran, en realidad, muy altas, pero a cientos de kilómetros de distancia.

Consideradas individualmente, las auroras parecen consistir en una sucesión al azar de formas curiosas teñidas de colores suaves, pero la típica subtormenta auroral (que suele coincidir con una perturbación magnética) sigue en realidad una pauta regular, con cinco etapas de desarrollo bien diferenciadas. El primer indicio de que va a producirse una aurora suele ser la aparición de un arco de luz verde —el arco quiescente— en el cielo del norte, poco después de la puesta de sol.

Este arco está formado por una lámina vertical o cortina de luz de tan sólo unos cientos de metros de grosor, que sigue una línea de latitud geomagnética. Puede tener cientos, e incluso miles, de kilómetros de longitud, y viene a durar aproximadamente una hora, sin apenas cambios. Si la perturbación magnética se extingue, el arco se desvanece; pero si se intensifica, el fenómeno entra en la fase de arco activo.

El borde inferior del arco se hace más fino y adquiere un llamativo brillo azulado, desplazándose con rapidez hacia el sur. Al mismo tiempo, la forma del arco se descompone en rayos paralelos o haces de rayos, que se extienden hacia arriba, en dirección al cenit, y por lo general se desplazan de este a oeste a lo largo del arco. Si el fenómeno continúa ganando intensidad, comienza la tercera fase.

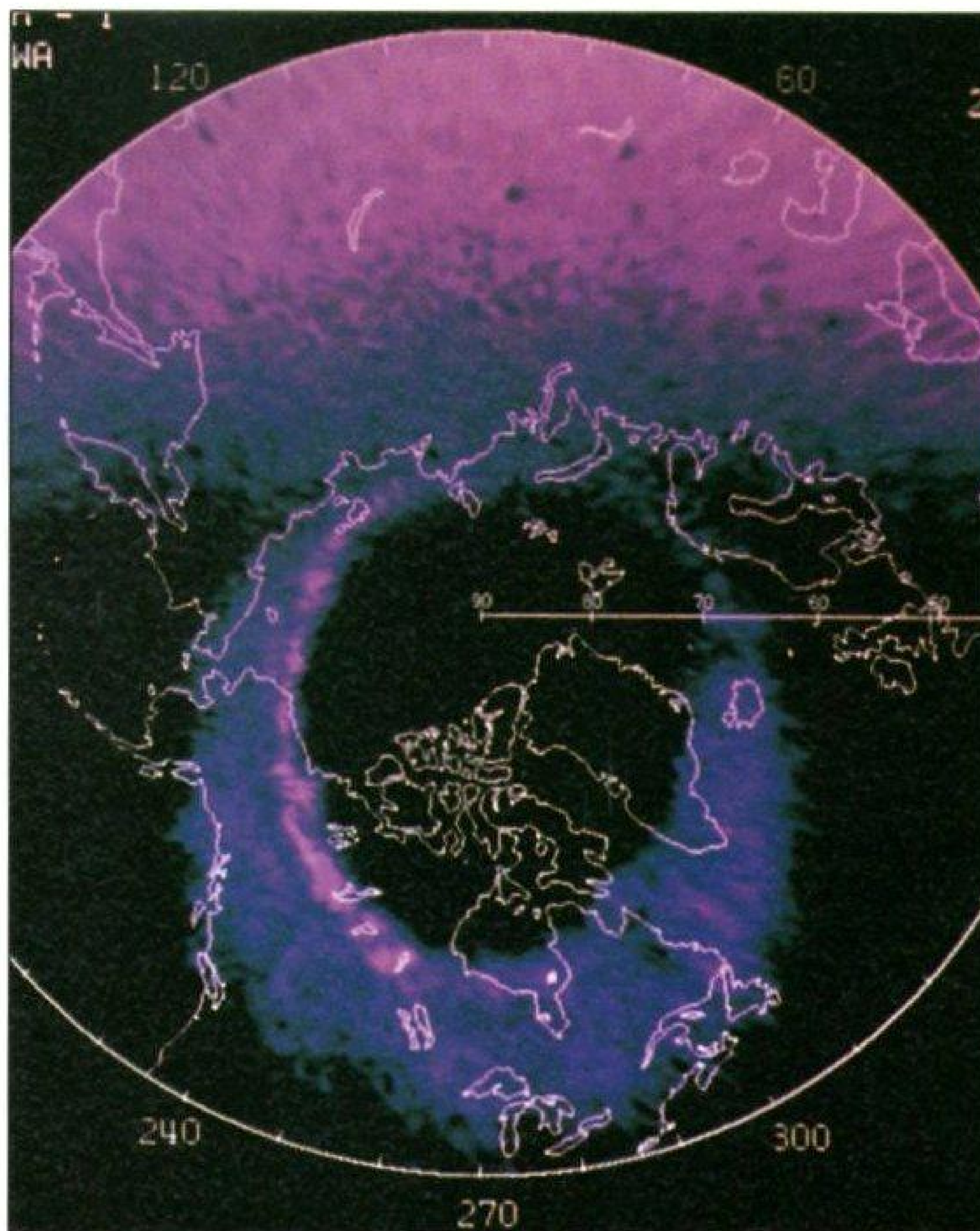
Esta fase, la corona auroral, es la más espectacular aunque dura muy poco. La cortina se encuentra ahora casi encima y, mirando a su interior, se puede observar una formación circular, semejante a una corona, hacia la que convergen los rayos y estrías. De vez en cuando, la corona se funde, transformándose en un abanico de luz que cubre el cielo; otras veces, inicia rápidas pulsaciones, emitiendo miles de rayos en cascada.

Cuando la corona se desvanece, comienza un período de actividad auroral errática, que en las islas Shetland, al norte de Escocia, se denomina «los alegres bailarines». Se trata de un despliegue de franjas o puntos de luz que aparecen y desaparecen rítmicamente, a veces acompañados de llamaradas, en un espectáculo deslumbrante.

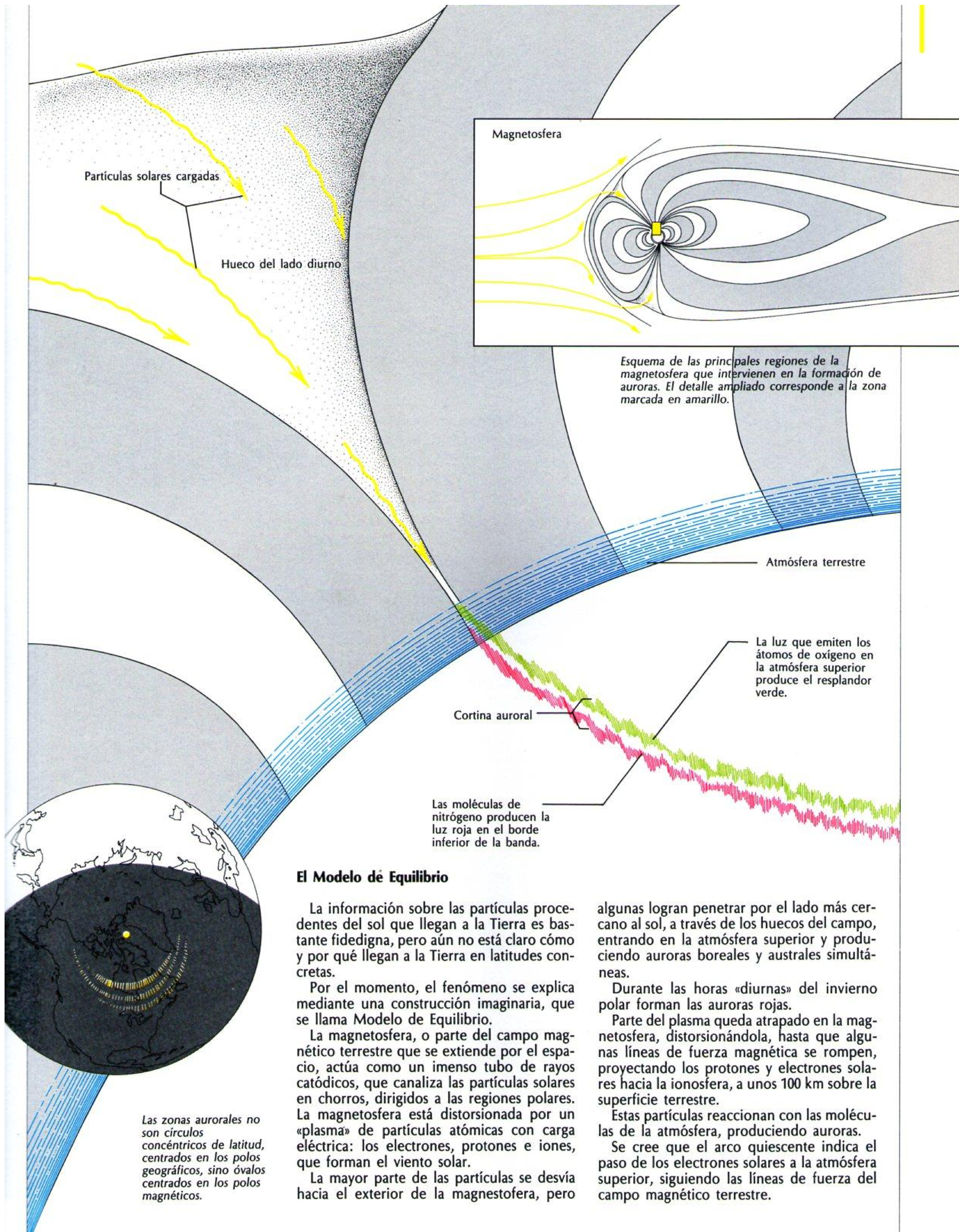
El hecho de que las auroras estén relacionadas con el campo magnético de la Tierra no basta para explicar sus causas. Cuando el filósofo griego Aristóteles contempló esta exhibición de luces pulsátiles, llegó a la conclusión de que el aire se estaba transformando en fuego líquido. Pero desde hace bastantes años se cree que las auroras están



Mediante el estudio de fotografías de auroras, tomadas al mismo tiempo desde dos o más puntos de observación conectados telefónicamente, el noruego Carl Størmer consiguió determinar de manera concluyente su verdadera posición en la atmósfera.



Esta sorprendente imagen, tomada desde el espacio por el satélite Dynamics Explorer I, muestra un arco de auroras boreales en torno al polo norte magnético. La zona se extiende más al sur en Norteamérica que en Europa. Por eso, aunque Estocolmo se encuentra mucho más al norte que, por ejemplo, Nueva York, en ambas ciudades se observa cada año un número similar de auroras (unas diez).



Esquema de las principales regiones de la magnetosfera que intervienen en la formación de auroras. El detalle ampliado corresponde a la zona marcada en amarillo.

Las zonas aurorales no son círculos concéntricos de latitud, centrados en los polos geográficos, sino óvalos centrados en los polos magnéticos.

El Modelo de Equilibrio

La información sobre las partículas procedentes del sol que llegan a la Tierra es bastante fidedigna, pero aún no está claro cómo y por qué llegan a la Tierra en latitudes concretas.

Por el momento, el fenómeno se explica mediante una construcción imaginaria, que se llama Modelo de Equilibrio.

La magnetosfera, o parte del campo magnético terrestre que se extiende por el espacio, actúa como un imenso tubo de rayos catódicos, que canaliza las partículas solares en chorros, dirigidos a las regiones polares. La magnetosfera está distorsionada por un «plasma» de partículas atómicas con carga eléctrica: los electrones, protones e iones, que forman el viento solar.

La mayor parte de las partículas se desvía hacia el exterior de la magnestofera, pero algunas logran penetrar por el lado más cercano al sol, a través de los huecos del campo, entrando en la atmósfera superior y produciendo auroras boreales y australes simultáneas.

Durante las horas «diurnas» del invierno polar forman las auroras rojas.

Parte del plasma queda atrapado en la magnetosfera, distorsionándola, hasta que algunas líneas de fuerza magnética se rompen, proyectando los protones y electrones solares hacia la ionosfera, a unos 100 km sobre la superficie terrestre.

Estas partículas reaccionan con las moléculas de la atmósfera, produciendo auroras.

Se cree que el arco quiescente indica el paso de los electrones solares a la atmósfera superior, siguiendo las líneas de fuerza del campo magnético terrestre.



Los indios canadienses creían que las auroras eran mensajeros de los dioses. El 5 de octubre de 1591 se vio en Nuremberg un resplandor «rojo sangre» que se atribuyó a un incendio en los cielos. Más adelante, la obra de astrónomos como Halley y Celsius acrecentó el interés por los fenómenos aurorales. En 1838-1840, Francia envió una expedición científica a Noruega, donde se realizó el grabado de la parte inferior de esta página.

producidas por partículas emitidas por el sol, que se mueven a velocidades tan tremendas que son capaces de penetrar en la ionosfera, o atmósfera superior de la Tierra. La invasión de estas velocísimas partículas excita a las móleculas del aire, que se vuelven luminosas, originando la luz de la aurora. Los diferentes tipos de partículas provocan diferentes tipos de aurora.

Las auroras más brillantes, que cubren el cielo y pasan por todas las fases del ciclo, están producidas por las llamaradas solares, que se forman en zonas activas de la superficie del sol. Su intensidad varía en relación con el ciclo de las manchas solares, y las manifestaciones más espectaculares tienen lugar dos o tres años después de un período de máxima actividad de las manchas.

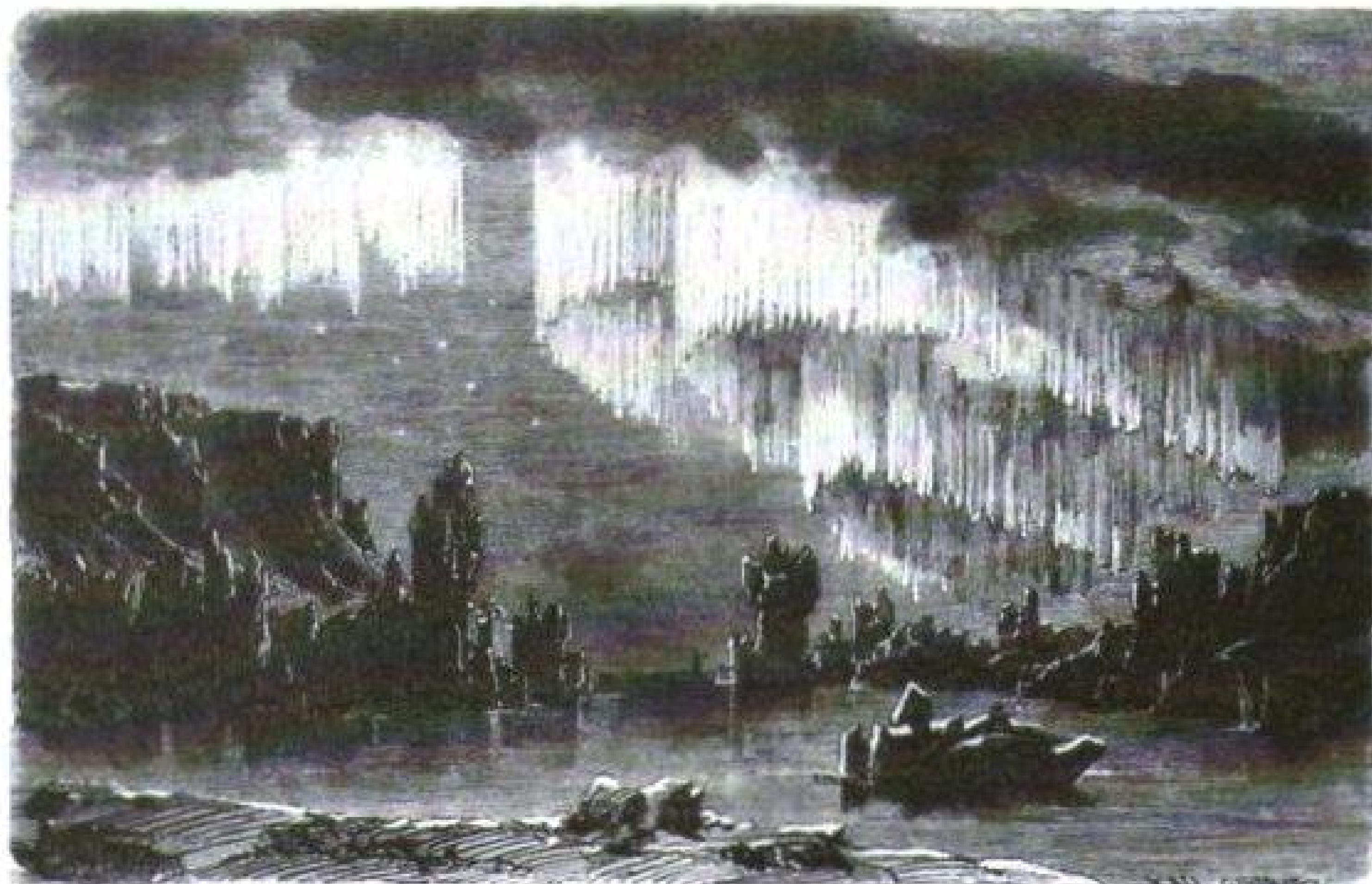
La teoría científica aún no ha conseguido resolver muchos aspectos de las auroras. Sólo existen especulaciones acerca de las causas de las innumerables transformaciones que experimentan las delicadas estructuras de colores que se observan en una aurora. Y tampoco se ha logrado explicar un curioso fenómeno corroborado por los observadores: la presencia de auroras entre ellos y las montañas lejanas.

Las auroras adquirieron importancia práctica en los años veinte, cuando se hicieron rebotar por primera vez ondas de radio en la ionosfera, con el fin de ampliar el alcance de las comunicaciones por radio. Se descubrió entonces que las auroras absorben algunas señales de radio y reflejan otras, distorsionándolas de maneras curiosas. Sin embargo, ahora las señales de radio se trasmiten desde satélites en órbitas elevadas, por lo que atraviesan directamente la ionosfera y resultan mucho menos afectadas.

Todavía hay varias preguntas sin respuesta acerca de los efectos de las auroras. Por ejemplo, muchas de ellas van acompañadas de campos eléctricos transitorios en la alta atmósfera, que de algún modo inducen corrientes eléctricas en la superficie de la tierra. Estas corrientes, a su vez, interfieren con las trasmisiones telefónicas o de teletipo, y pueden ocasionar lecturas incorrectas en los aparatos empleados para localizar yacimientos de petróleo o de minerales. Las corrientes más intensas pueden llegar a activar los interruptores automáticos de las centrales eléctricas, provocando apagones como el que tuvo lugar en Quebec en 1989.

Aun más curioso es que mucha gente asegure oír chasquidos y crujidos durante las manifestaciones aurorales más violentas. Estos sonidos no se deben a ondas sonoras generadas por la aurora; lo más probable es que se produzcan al nivel del suelo y se deban a algún fenómeno eléctrico y/o magnético, aún sin detectar, que acompaña al despliegue visual. La aurora conserva su misterio.

Aurora era la diosa romana del amanecer, y el término aurora borealis *lo acuñó Galileo en 1621 para describir las asombrosas «luces del norte». Esta fotografía (derecha), tomada en Fairbanks, Alaska, muestra un típico despliegue auroral.*





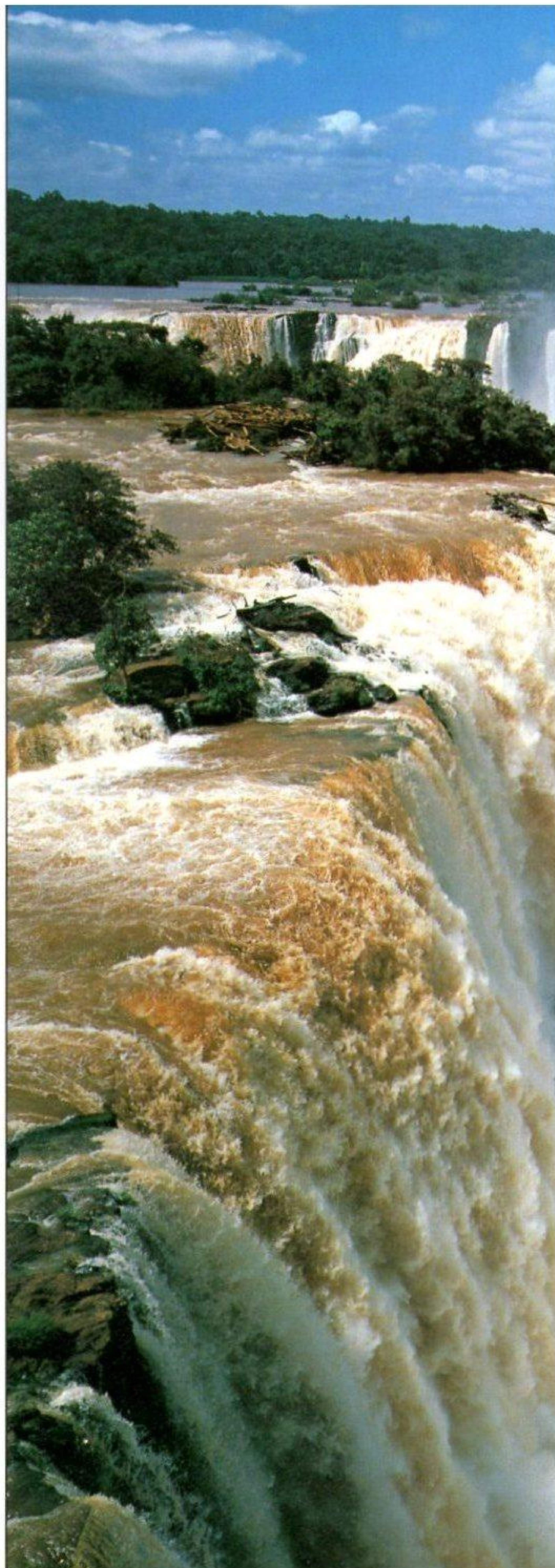
La fuerza irresistible

Un niño deja caer una cuchara; ésta cae al suelo por efecto de la gravedad. El esquiador sube hasta lo alto de la pista y empieza a deslizarse hacia abajo: la fuerza de la gravedad le impulsa en su recorrido. La luna gira en torno a la Tierra impulsada por la fuerza de la gravedad; la misma fuerza hace girar a los planetas, cometas y asteroides alrededor del sol. Y la misma fuerza mantiene el majestuoso disco giratorio de nuestra galaxia, la Vía Láctea, de más de 100.000 años luz de diámetro.

Estos pocos ejemplos bastan para demostrar la ubicuidad y omnipotencia de la gravedad. A diferencia de casi todas las demás fuerzas e influencias, parece actuar con igual potencia y efectividad a todos los niveles, desde lo diminuto a lo astronómico. Pero se necesitó el gigantesco y penetrante intelecto de Isaac Newton para llegar a captar sus principios.

En 1687 —y, según la leyenda, tras especular sobre la caída de una manzana en su jardín—, Newton publicó por fin su obra cumbre, *Principios matemáticos de filosofía natural,* conocida en forma abreviada como «*Los Principios*». El libro abarcaba muchos temas, pero quizá el más importante era el enunciado de la Ley de Gravitación Universal, que establecía, como una de las condiciones fundamentales del universo, que todo cuerpo material atrae a los demás cuerpos en virtud de la fuerza gravitatoria. La intensidad de esta fuerza depende de las masas de los cuerpos que se atraen, y disminuye rápidamente —en proporción inversa al cuadrado de la distancia— cuando aumenta la separación entre ellos. Esta exposición, tan profunda como simple, permitía predecir desde la caída de una manzana hasta las órbitas de los planetas.

La gravedad es, sin duda alguna, la fuerza que organiza y controla el comportamiento a gran escala de todos los componentes del universo. Todo objeto de gran tamaño, ya se trate de un planeta, de una estrella o de una galaxia, está rodeado por un campo gravitatorio. En la actualidad, gracias a las



Las cataratas del Iguazú, en la frontera entre Brasil y Argentina, ofrecen un espectacular ejemplo de la fuerza de la gravedad: «Un océano que se vierte en un abismo», según las palabras del botánico suizo Robert Chodat. En total, son unas 275 cascadas individuales, que caen desde una altura de 82 m a una estrecha hondonada conocida como Garganta del Diablo, desde un borde de 4 km de anchura. A continuación, las aguas atraviesan la meseta hasta unirse al río Paraná, unos 22 km más al sur.



teorías de Einstein, que desarrolló el concepto de la gravedad según Newton, este campo tiende a describirse como un «pozo de gravedad», un hoyo o depresión en la trama del espacio-tiempo, cuya pendiente y profundidad están determinadas por la cantidad de materia que tiene el objeto. Esta curvatura o deformación del espacio-tiempo hace que toda la materia y todas las formas de energía —como, por ejemplo, la luz— se desvíen al pasar por el campo gravitatorio de los objetos más grandes, como las estrellas.

Otros objetos o radiaciones que penetran en estas depresiones quedan atrapados en ellas, influidos por la fuerza gravitatoria. Cuando un vehículo espacial logra salir del pozo gravitatorio de la Tierra, ya sólo le afectan influencias gravitatorias muy pequeñas, y todos los objetos contenidos en él pierden su peso. El peso de un objeto no es más que la fuerza gravitatoria que actúa sobre su masa de una situación concreta.

Los avances científicos del siglo XX han aportado numerosas adiciones al maravilloso edificio construido por Newton. Gracias a la teoría de la relatividad de Einstein sabemos que la masa y la energía son intercambiables. La una puede transformarse en la otra, con la explosión devastadora de una bomba atómica.

También hemos dado un salto con la imaginación al considerar objetos de tan enorme densidad que su pozo gravitatorio es tan profundo y empinado que nada puede escapar de él. Estos objetos son los famosos «agujeros negros», entidades cósmicas cuya gravedad es tan intensa que incluso impide que escape la luz. Es posible que existan masas misteriosas de este tipo en el corazón de muchas galaxias, formando un enorme núcleo invisible, alrededor del cual giran las miríadas de soles que forman la galaxia.

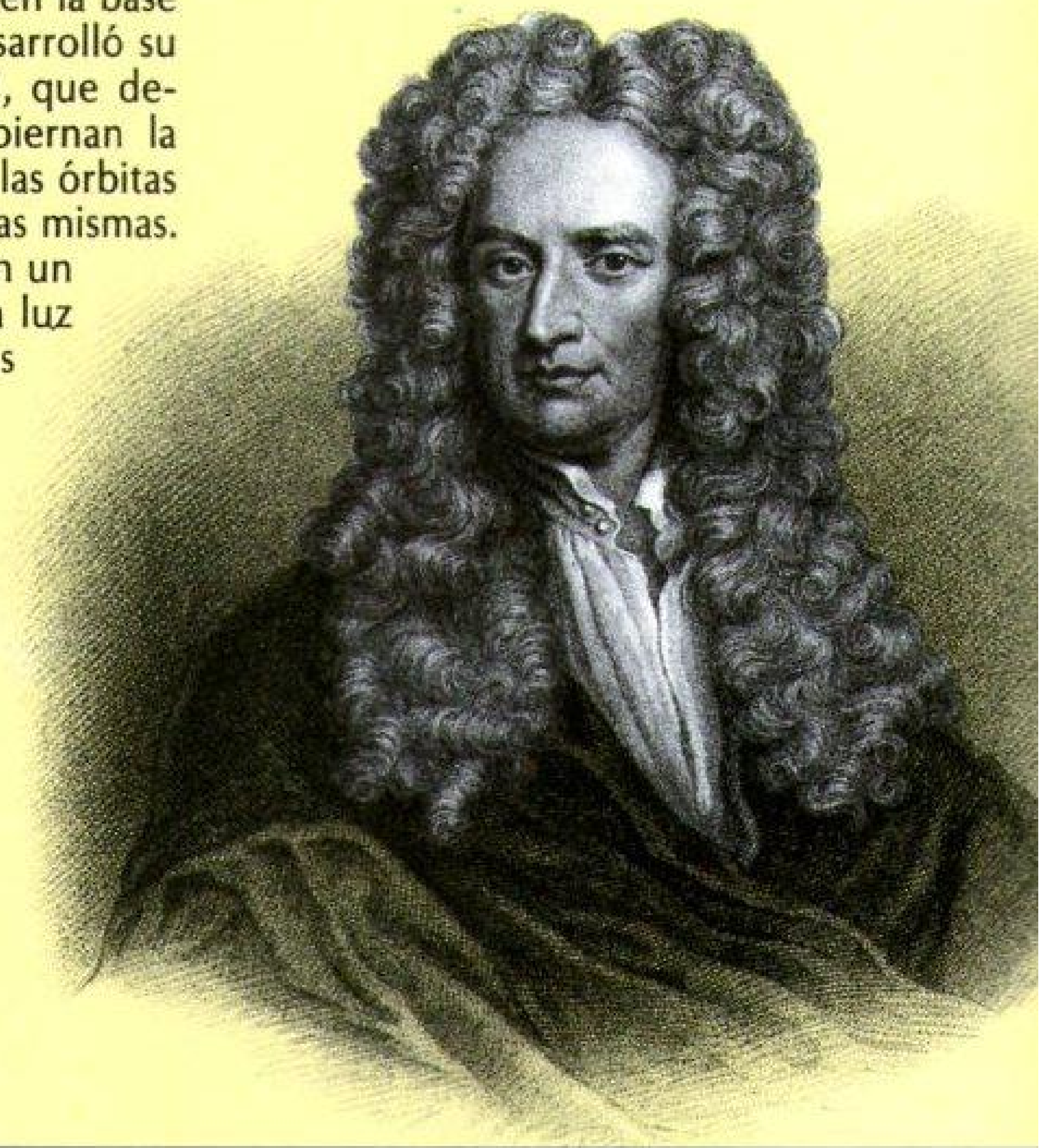
La especulación acerca de los misterios de la gravedad ha ido aun más lejos. Sabiendo que una carga eléctrica móvil o vibratoria emite ondas electromagnéticas, se ha conjeturado que una masa vibratoria lo bastante grande podría producir ondas de gravedad, perturbaciones ondulatorias en el campo gravitatorio, que se desplazarían a la velocidad de la luz. En numerosos laboratorios se están realizando experimentos con el fin de comprobar la existencia de dichas ondas.

Isaac Newton (1642-1727)

Matemático, físico, astrónomo y filósofo, considerado por muchos como el científico más brillante que jamás ha existido, Newton estudió en la Universidad de Cambridge, y cuando la universidad se cerró en 1664-1666, a causa de la peste, se retiró a su casa de Woolsthorpe, Lincolnshire, donde, con sólo veintitrés años de edad, realizó sus descubrimientos más importantes.

Durante este período formuló sus tres leyes del movimiento, que constituyen la base de toda la ciencia mecánica, y desarrolló su teoría de la Gravitación Universal, que demuestra que las fuerzas que gobiernan la caída de los objetos en la Tierra y las órbitas de los planetas en el espacio son las mismas. Descomponiendo la luz del sol con un prisma de cristal, descubrió que la luz blanca está compuesta por todos los colores del espectro. Y comenzó a trabajar en el cálculo, una forma de las matemáticas que más tarde le permitió explicar sus ideas científicas.

Sin embargo, no publicó sus descubrimientos hasta 1687, en su obra *Principios*, a la que siguió, en 1704, la *Optica*. en 1691 fue nombrado profesor de matemáticas en Cambridge; en 1703, presidente de la Royal Society y más tarde director de la Real Casa de la Moneda; y en 1705 se le concedió el título de caballero, en reconocimiento de sus servicios y de sus sobresalientes méritos científicos.



Este grabado, realizado en 1702 por Godfrey Kneller, representa a Newton a la edad de 50 años.

Ninguno de estos intentos ha producido resultados inequívocamente positivos, aunque existen grandes esperanzas de que una explosión de supernova registrada hace poco emita ondas gravitatorias detectables.

En la última década, nuestra tendencia a sondear lo misterioso ha dado lugar a varios intentos de elaborar «teorías del Todo», que pretenden encontrar lazos de conexión entre todas las fuerzas de la naturaleza, incluida la gravedad. Según nuestros conocimientos actuales, en condiciones normales operan cuatro de estas fuerzas: la gravedad, el electromagnetismo, y las fuerzas nucleares «fuertes» y «débiles», que controlan las estructuras de los núcleos atómicos. Estas dos últimas fuerzas actúan tan sólo a distancias pequeñísimas, mientras que la gravedad y el electromagnetismo tienen efecto a distancias inmensas.

La gravedad es, con mucha diferencia, la fuerza más débil de las cuatro. Las otras son, por lo menos, 10^{35} (es decir, 100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000) veces más intensas. Sin embargo, a pesar de su escasa eficacia, la gravedad domina en el plano astronómico, ya que puede actuar a cualquier distancia. Las fuerzas electromagnéticas no controlan los movimientos cosmológicos porque el universo es electromagnéticamente neutro: cada carga positiva está contrarrestada por una carga negativa equivalente.

Algunos científicos han sugerido que, a niveles de energía muy elevados, estas cuatro fuerzas tan dispares podrían fundirse en una sola. Es muy posible que semejantes niveles energéticos sólo se hayan dado en los primeros momentos del «Big Bang», la explosión que dio origen al universo. De ser así, tuvo que tratarse de un majestuoso despliegue de la naturaleza: en aquellos primeros momentos se revelaron las fuerzas y comenzó a existir la materia.

Las cuatro fuerzas

Gravedad

De las cuatro «fuerzas de la naturaleza» que conocemos, la gravedad es la que predomina en lo referente al control de la macroestructura del universo, determinando, por ejemplo, las órbitas de los planetas en torno a una estrella. Y esto es así, a pesar de que se trata de la más débil de las cuatro, porque actúa a distancias infinitas.

Tierra

Luna

Fuerza nuclear débil

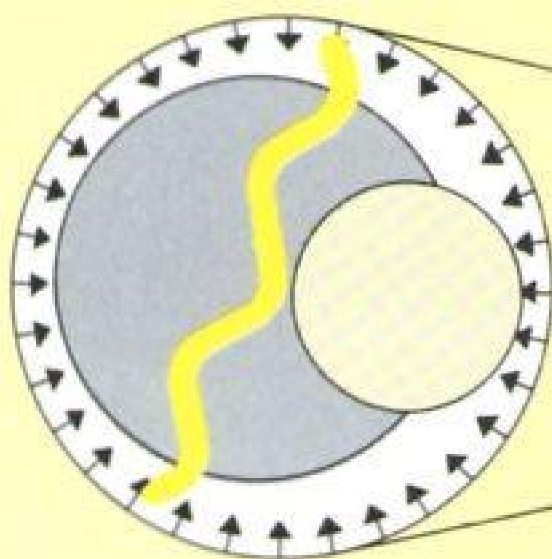
Mucho más fuerte que la gravedad, aunque sólo actúa a distancias subatómicas mínimas. Controla la desintegración de algunas partículas fundamentales, como, por ejemplo, la fragmentación del neutrón, que da lugar a un protón, un electrón y una misteriosa partícula sin masa ni carga, llamada neutrino.

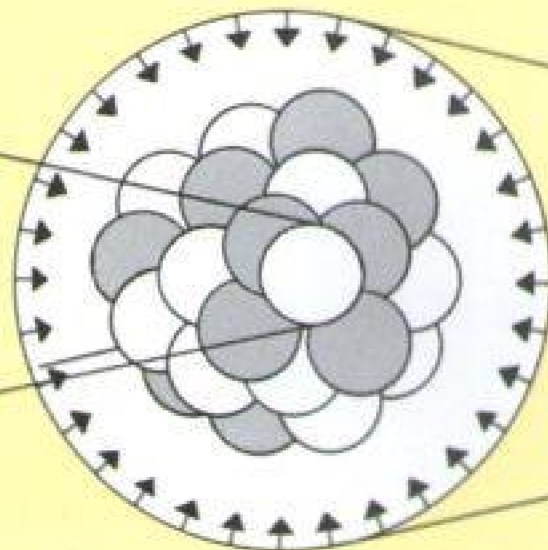
Fuerza nuclear fuerte

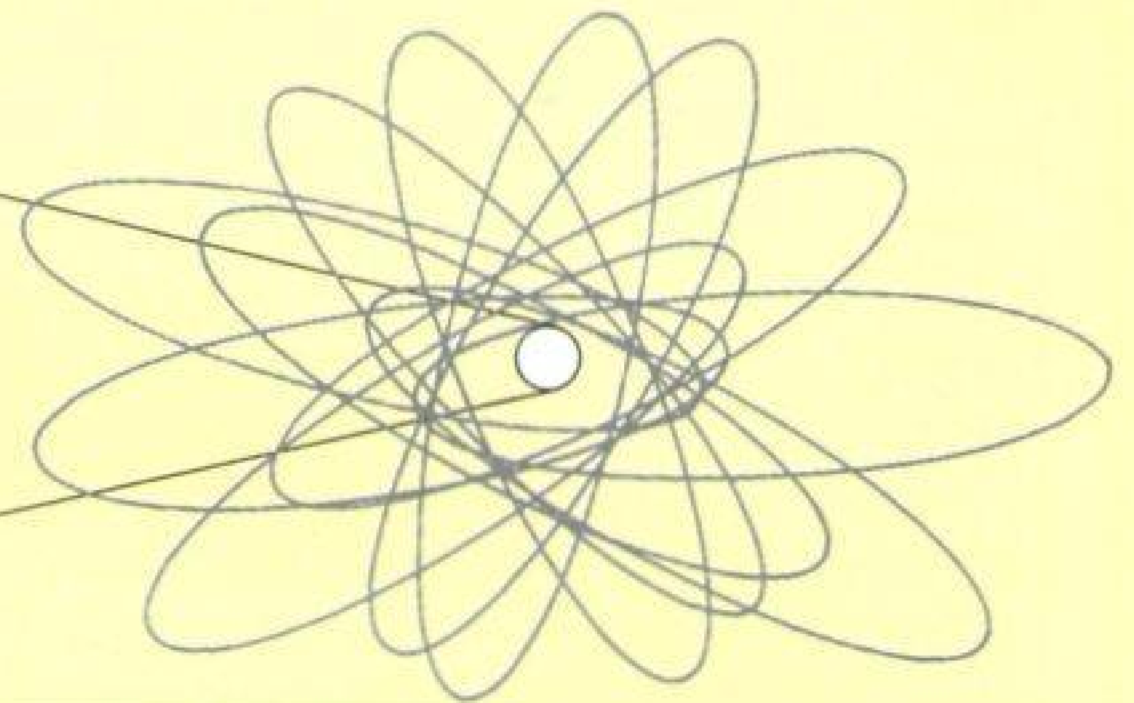
Esta es la fuerza que mantiene unidos los núcleos de los átomos, formados por neutrones sin carga eléctrica y protones con carga positiva. Si no fuera por ella, los protones del núcleo se repelerían unos a otros, ya que tienen la misma carga, y el núcleo atómico —la materia que conocemos— no podría formarse.

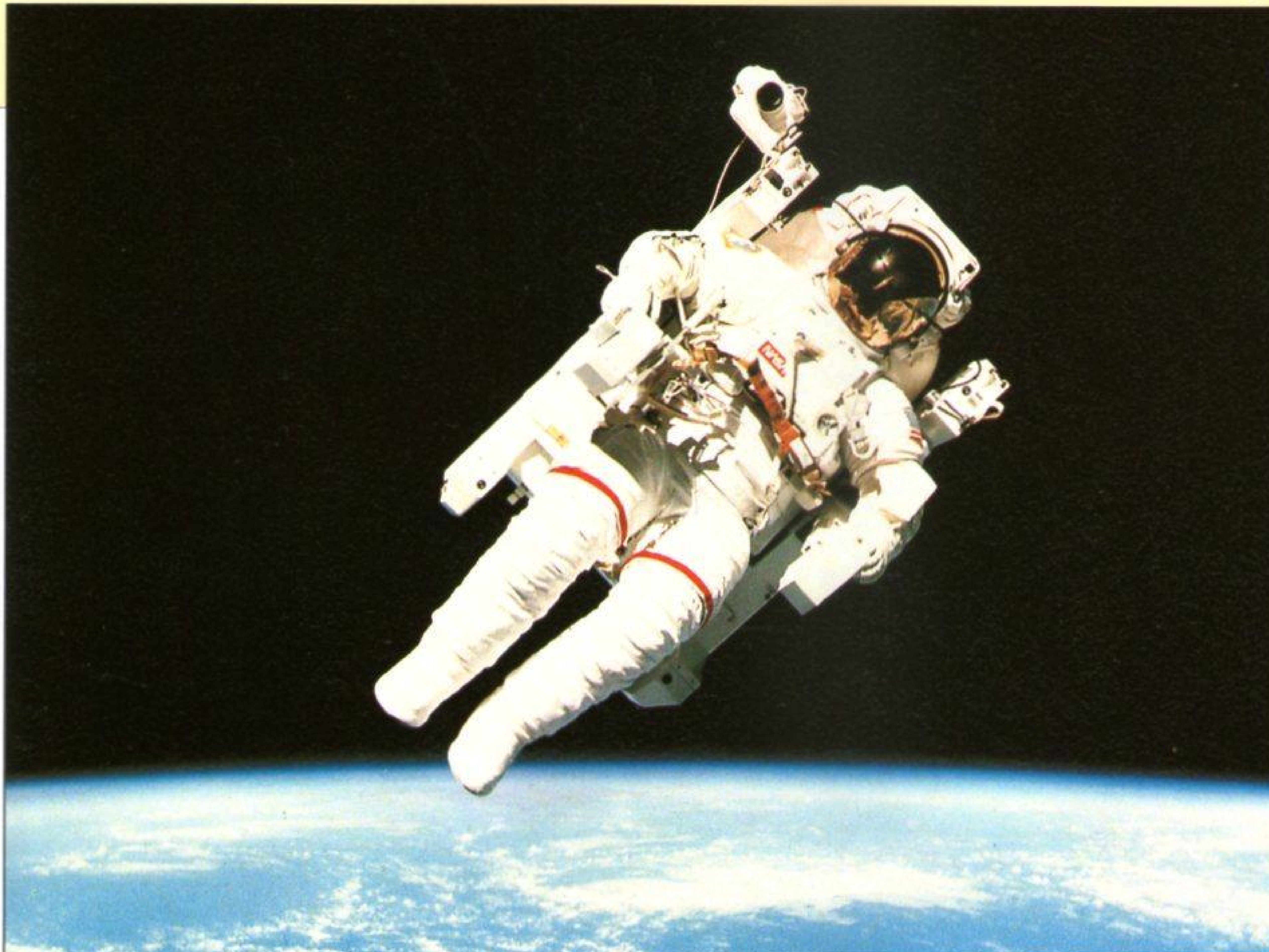
Fuerza electromagnética

Así se denomina a la fuerza de la polaridad magnética, que provoca la atracción mutua de las cargas opuestas, positiva y negativa. La fuerza electromagnética puede actuar a distancias infinitas, pero también estabiliza, por ejemplo, las órbitas de los electrones —con carga negativa— alrededor del núcleo positivo del átomo.









El astronauta norteamericano McCandless flota sobre la Tierra en su unidad de maniobras, durante el décimo viaje de la lanzadera espacial, en febrero de 1984. La unidad, que funciona con propulsores de nitrógeno de operación manual, permite al astronauta moverse a voluntad, superando los efectos de la ingravidez, o gravedad cero.

Ritmos sin fin

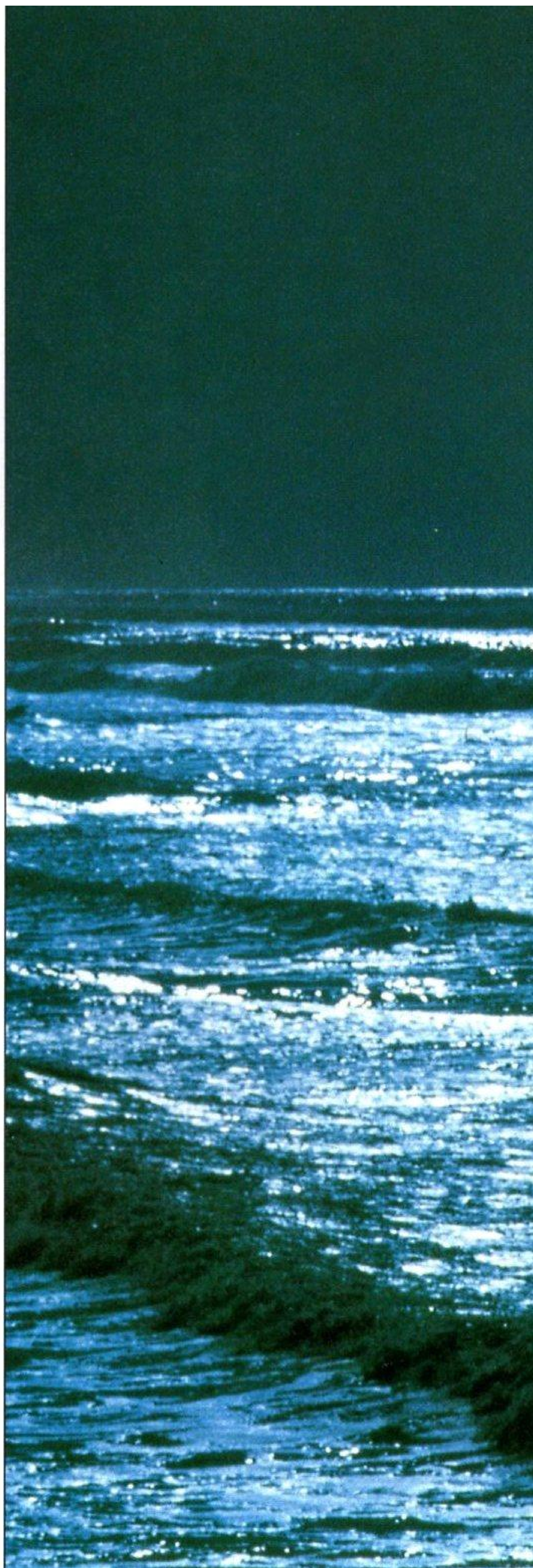
En el año 55 a. C., Julio César quedó casi abrumado por un misterio de la naturaleza que debió parecerle un acto de magia particularmente efectivo, llevado a cabo por sus enemigos. Su ejército expedicionario estaba atacando la costa sur de Gran Bretaña, y sus expertos y disciplinados marineros parecían totalmente desconcertados por las enormes mareas que tienen lugar en el canal de la Mancha.

Al comenzar la campaña, aquellos marineros, acostumbrados a las mareas casi imperceptibles que caracterizan a gran parte del Mediterráneo, no habían amarrado sus barcos a la debida altura de la costa. El resultado fue que una marea muy alta, combinada con una tormenta, provocó graves daños y la pérdida de muchos barcos de la flota romana. La campaña logró superar esta catástrofe, pero sin duda César debió preguntarse qué fuerzas eran aquéllas, capaces de empujar al mar a tanta distancia.

En la actualidad, creemos saber de qué fuerzas se trata, dónde se originan y por qué las mareas varían tanto en diferentes partes del mundo. Pero algunos aspectos del fenómeno de las mareas todavía provocan perplejidad y desconcierto.

Por ejemplo: ¿cómo se habitúan los animales marinos al ritmo de las mareas? ¿Es pura coincidencia que el ciclo menstrual de las mujeres tenga la misma periodicidad que uno de los principales ciclos mareales? ¿Existen mareas atmosféricas, además de las del mar? Para empezar a comprender tales problemas y posibilidades, debemos remontarnos a la base cósmica de las mareas terrestres.

Los pueblos primitivos sabían que las mareas estaban relacionadas de algún modo con las posiciones y fases de la luna, pero para saber cuál era esta relación hubo que esperar a que Isaac Newton explicara la existencia de la gravedad y sus efectos sobre toda la materia. Al publicarse su teoría en 1687, quedó claro que entre todos los cuerpos actúan fuerzas gravitatorias, cuya intensidad depende de la masa de dichos cuerpos



La luna llena sobre un mar de plata parece el símbolo mismo de la tranquilidad. Pero la quietud de la escena oculta una actividad constante, ya que el misterioso poder de la luna genera el interminable movimiento de las mareas de los océanos y tal vez provoque mareas similares en la atmósfera que nos rodea.

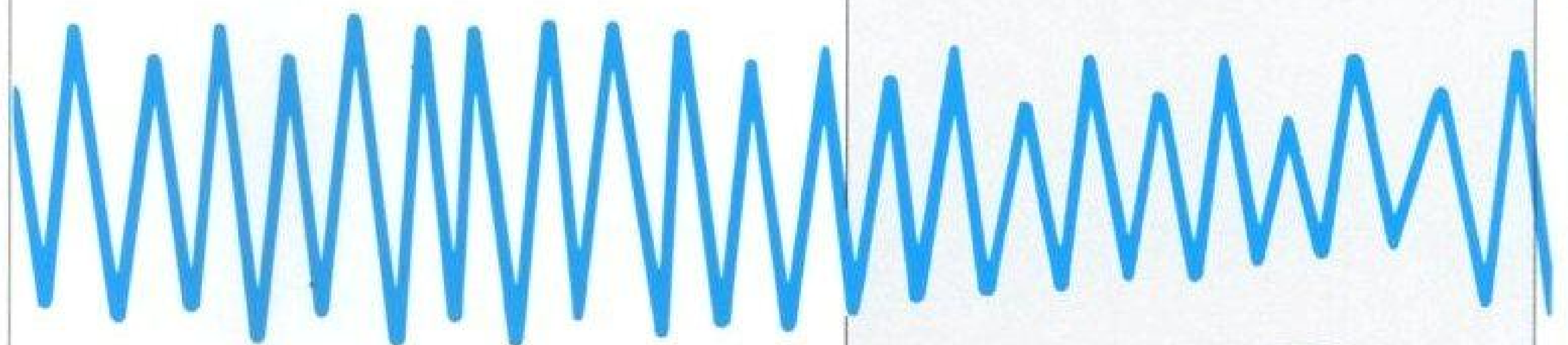


y de la proximidad entre ellos. Así pues, los movimientos mareales de los océanos se debían a causas gravitatorias: la atracción que hace subir y bajar alternativamente las aguas es el resultado de una complicada coreografía de la Tierra, el sol y la luna en la inmensidad del espacio.

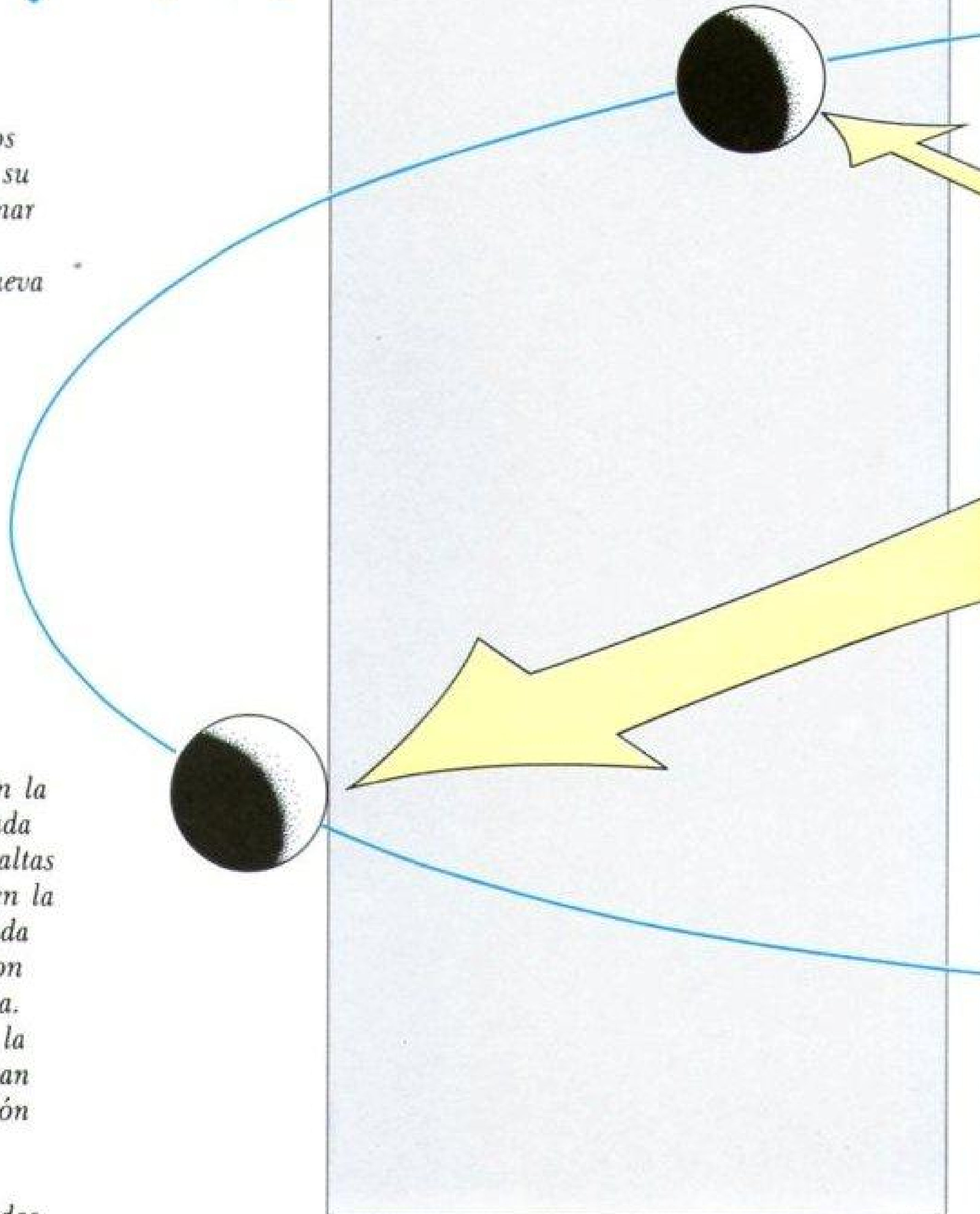
Tanto la luna como el sol ejercen una atracción gravitatoria sobre el agua de los océanos. Aunque la masa del sol es 27 millones de veces mayor que la de la luna, la influencia de nuestro pequeño satélite sobre las mareas es muy superior: aproximadamente un 70 por 100, frente a un 30 por 100 del sol. Esto se debe a la menor distancia que lo separa de la Tierra: la luna sólo se encuentra a unos 380.000 kilómetros, mientras que del sol nos separan 150 millones de kilómetros.

Así pues, la luna es la principal generadora de mareas, que se producen cuando atrae las aguas que se encuentran debajo de ella, haciendo que se abomben. Al rotar la Tierra, este abombamiento se experimenta como una marea alta.

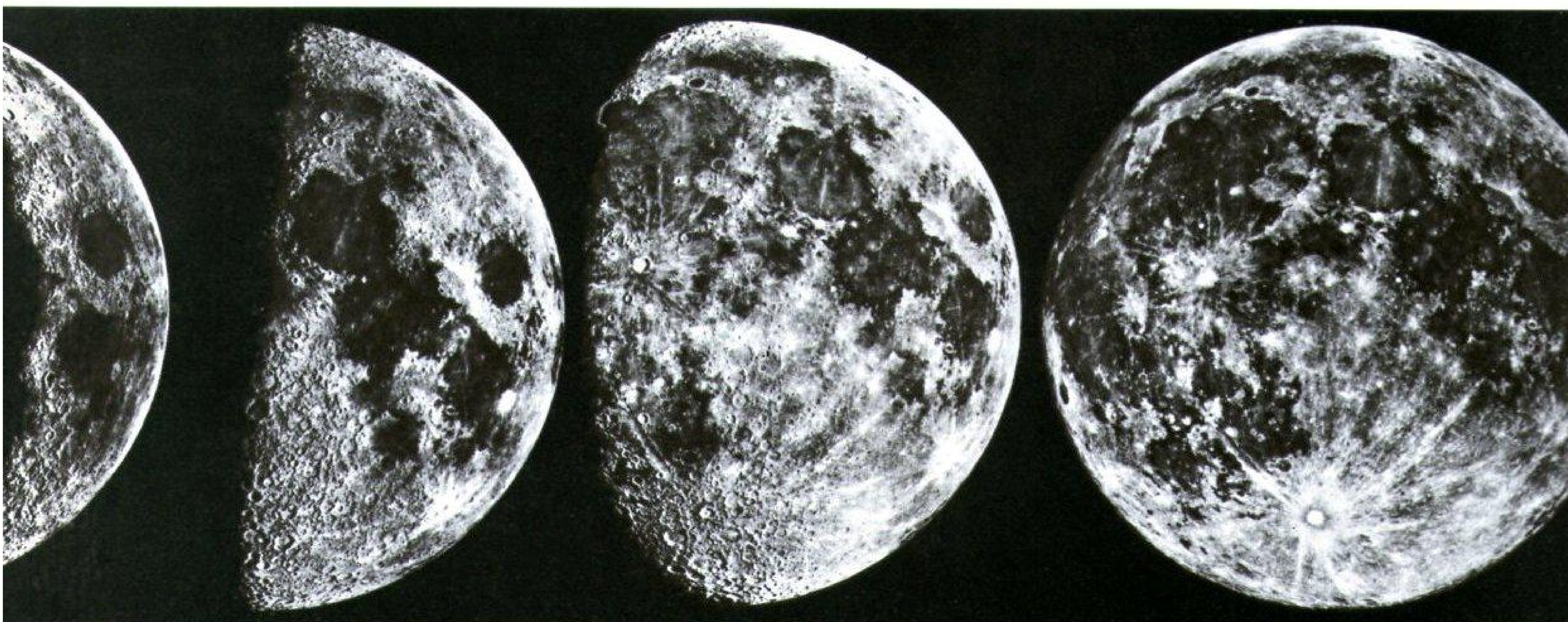
En la mayoría de las costas del planeta, un observador sentado en lo alto de la playa puede contemplar dos pleamares y dos bajamares cada 24 horas. En apariencia, se trataría de una situación anómala, ya que podría pensarse que, dado que la luna da una vuelta alrededor de la Tierra cada 28 días y la Tierra gira sobre sí misma cada 24 horas, sólo debería darse una marea alta cada 24 horas.



La periodicidad de los ritmos mareales, de 14 y 28 días, y su relación con la secuencia lunar en la costa altántica de los Estados Unidos, cerca de Nueva York.



Cuando el sol y la luna se encuentran en línea recta con la Tierra, su atracción combinada ocasiona mareas vivas, muy altas en la pleamar y muy bajas en la bajamar, que se producen cada dos semanas, coincidiendo con la luna llena y la luna nueva. En las semanas intermedias, la Tierra, la luna y el sol forman un ángulo recto, y la atracción del sol contrarresta la de la luna, provocando mareas muertas, mucho más moderadas.



Sol

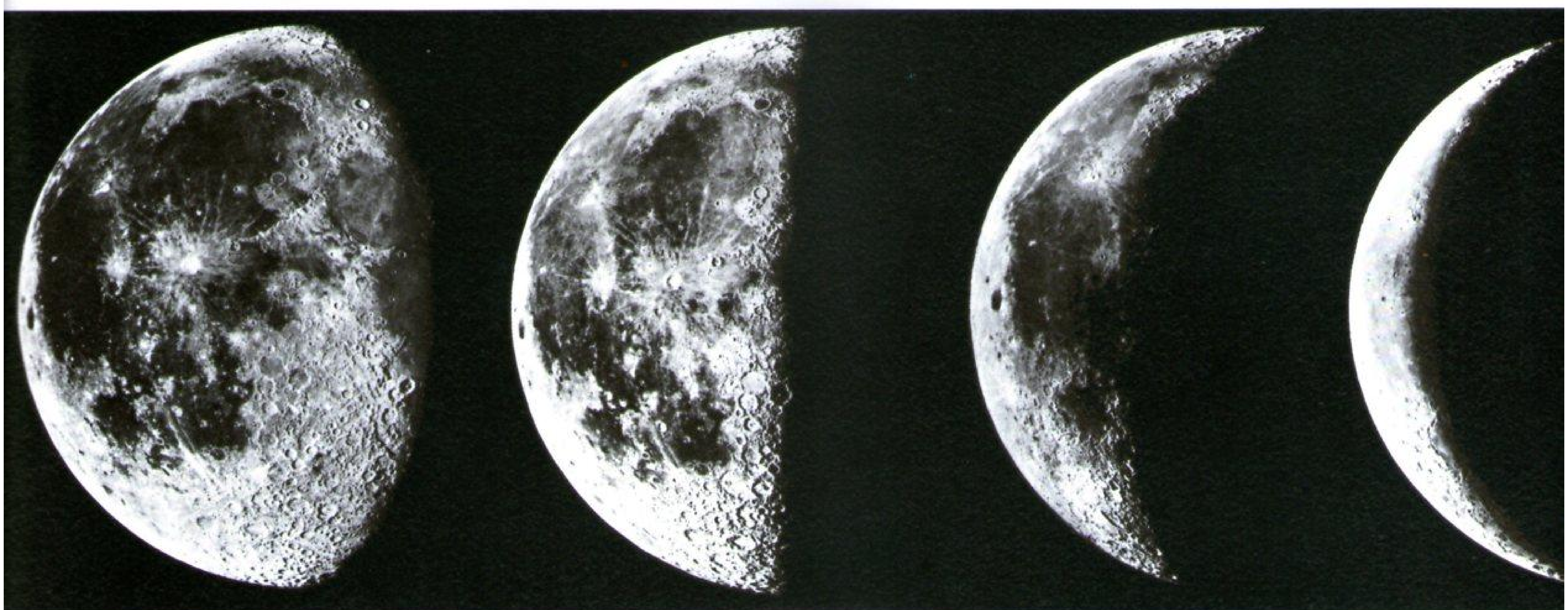
Marea viva

Marea muerta

Tierra

Luna

La luna brilla porque refleja la luz del sol, y las fases que observamos desde la Tierra corresponden a la fracción iluminada de su superficie. Cuando la luna se encuentra entre la Tierra y el sol, nos presenta su cara oscura, que nos resulta invisible. Cuando la Tierra se encuentra entre el sol y la luna, vemos la luna llena. En las fases intermedias, la luna nueva va creciendo —cuarto creciente— hasta convertirse en luna llena, y a partir de ahí su fracción iluminada disminuye hasta que sólo resulta visible un delgado arco.



Este aparente enigma queda resuelto cuando se considera con más detalle la danza orbital de la Tierra y la luna. Lo cierto es que la Luna no gira en realidad alrededor de la Tierra; ambos cuerpos giran en torno a un centro común de gravedad, situado sobre la línea recta que une sus centros. Este centro gravitatorio del eje Tierra-luna se encuentra en el interior de la Tierra, en la vertical del punto sobre el que se encuentra la luna en un momento dado.

Esto significa que aunque exista un abombamiento mareal del agua situada debajo de la luna, existe también un segundo abombamiento centrífugo en el otro lado del planeta. Son estas dos enormes jorobas de agua las que ocasionan dos mareas altas cada día en casi todos los lugares del mundo.

Cuando se tienen en cuenta los efectos combinados del sol y la luna sobre los océanos de la Tierra, empiezan a salir a la luz las razones de otros ritmos y pautas de las mareas.

Uno de ellos es la correlación que tanto impresionó a los adivinos, místicos y astrólogos del pasado: la evidente e inconfundible relación entre las fases de la luna y la variación en la altura de las mareas (a lo largo de períodos prolongados, ya que el ciclo presenta oscilaciones internas de 14 y de 28 días). Esta correlación explica, quizá mejor que cualquier otra coincidencia natural, la importancia que atribuían los antiguos a los procesos cósmicos y sus efectos sobre los habitantes de la Tierra: no cabe duda de que debió fomentar numerosas especulaciones místicas acerca de la influencia de otros cuerpos celestes, como las estrellas, sobre la vida humana.

Las posiciones relativas de la Tierra, el sol y la luna determinan la secuencia de fases lunares, y también son la causa de la pauta de mareas vivas y muertas. Las mareas vivas, con pleamares excepcionalmente altas y bajamares bajísimas, se producen en los períodos de luna nueva y luna llena, separados por un intervalo de dos semanas. Las mareas muertas se producen en el período intermedio, y su fluctuación es mucho menor. El ciclo completo se repite aproximadamente cada 28 días.

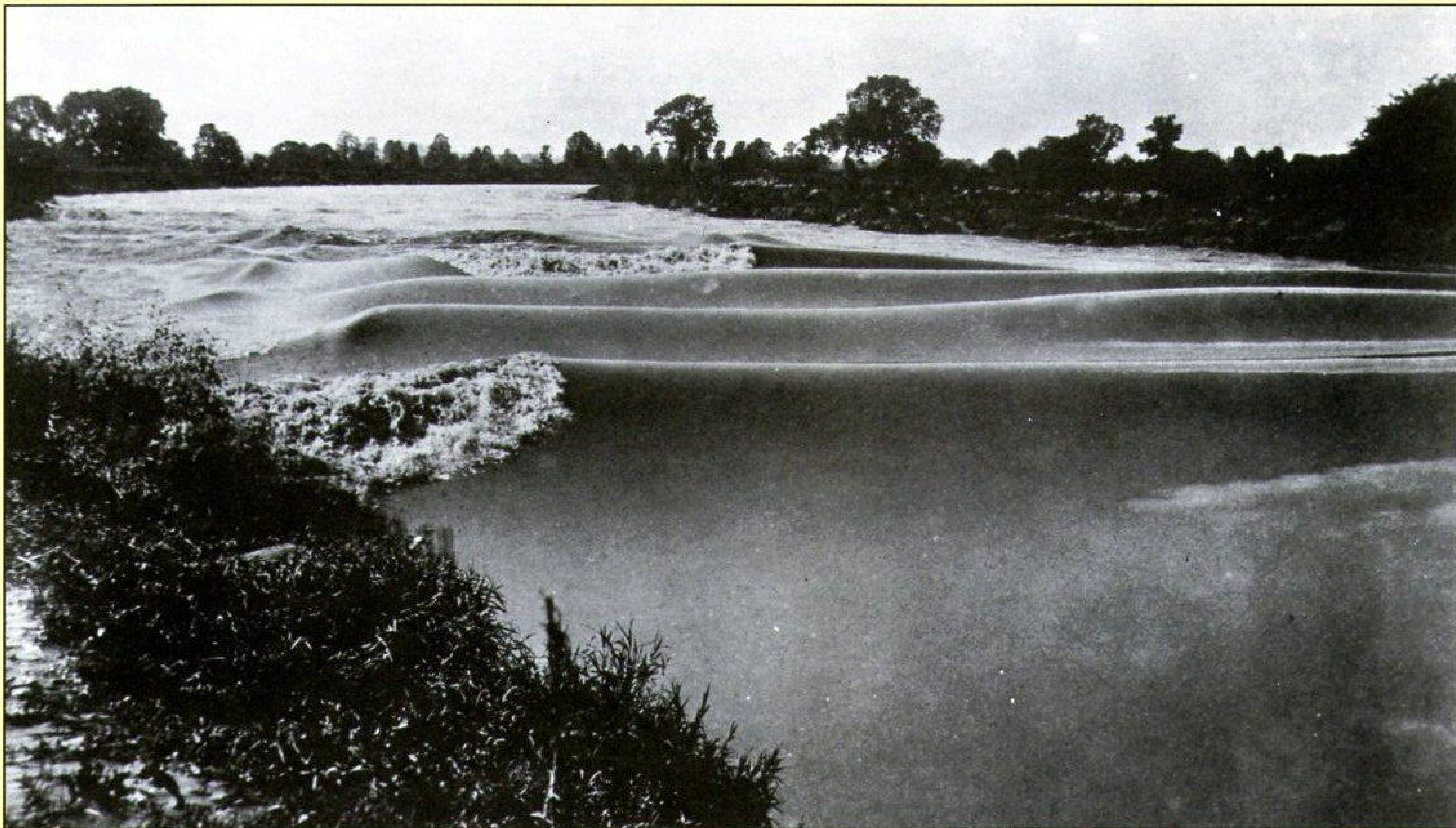
Esta misteriosa conexión entre las mareas y la fase de la luna se debe, una vez más, a la gravedad. En el momento de las mareas vivas, la Tierra, la luna y el sol se encuentran casi en línea recta, y por lo tanto las atracciones gravitatorias de nuestros dos compañeros celestes actúan a lo largo de la misma línea.

En consecuencia, provocan abombamientos muy por encima de lo normal, y se producen las mareas vivas. A mitad de camino entre la luna nueva y la llena, el sol y la luna se encuentran en ángulo recto con respecto a la Tierra; el tirón gravitatorio del uno anula en parte el del otro, y el resultado son mareas mucho menos acusadas.

En la práctica, tanto en la costa como en alta mar las mareas presentan periodicidades e irregularidades mucho más complicadas que lo que dan a entender estos sencillos modelos. Esto explica grandes anomalías del tipo de la que tanto confundió a Julio César.

Otros factores sutiles, como la fricción entre el fondo del océano y las masas de agua en movimiento, o el bloqueo físico de los movimientos del agua por las masas continentales, explican las diferencias entre las mareas de unos mares y otros. Por éstas y otras razones, el pequeño y cerrado mar

Olas de marea



Las mareas no sólo dependen de la gravedad, sino que también influyen en ellas la rotación de la Tierra, la posición de los continentes y las dorsales oceánicas, y la fricción del agua contra el fondo del mar. La combinación de estos factores da lugar a sistemas muy complicados en los grandes océanos, cada uno de los cuales tiene su propia cuenca en la que las mareas se mueven en sentido contrario al de las agujas del reloj, sobre un nodo central cada 12 horas.
Las líneas blancas conectan lugares en los que la pleamar se produce a la misma hora. Cada línea representa una hora más que la línea que la sigue. La altura de las mareas varía desde 0 en el punto nodal hasta más de 12 m en el canal de la Mancha, por ejemplo.



Al llegar a Lower Parting, a unos 29 km de la desembocadura del río Severn, la ola de marea tiene unos 84 metros de anchura y una velocidad de 16 a 21 km/h. Las olas más grandes coinciden con los equinoccios de primavera y otoño.

En aguas del Mediterráneo, como bien sabía César, la variación entre los niveles de la pleamar y la bajamar casi nunca llega al metro.

En otras partes del mundo, como la bahía de Fundy, en la costa este de Canadá, o el estuario del río Severn, en la costa suroeste de Inglaterra, la altura del agua puede variar más de 15 m entre la marea baja y la alta.

En ambos casos, se trata de entrantes que se estrechan, en una costa bañada por un océano muy grande.

En tales situaciones, la forma de embudo del entrante, relativamente poco profundo, constriñe el enorme volumen de agua que se desplaza hacia tierra al subir la marea, haciéndolo elevarse y provocando una marea más alta de lo normal.

Si el estrechamiento es muy acusado, se forma una ola de marea. Cuando las aguas que penetran en el estuario chocan con la corriente del río que viene en dirección contraria, se levanta una ola vertical que avanza tierra adentro, hasta que poco a poco va perdiendo impulso y se extingue.

La ola de marea más grande del mundo es la denominada «El Dragón de Plata», que se forma una vez al mes en la desembocadura del río Quiantang en el mar de la China. Alcanza alturas de más de 6 m, y constituye un peligro potencial para los campos vecinos. Hace poco, un equipo británico fracasó en su intento de practicar el surf sobre esta gigantesca pared de agua.

En la bahía de Fundy, un entrante de unos 270 km de longitud y 50-80 km de anchura, otra ola colosal invade el pequeño río Petitcodiac, provocando además un espectáculo asombroso en las cascadas del río St. John, donde el agua sube en vez de caer. Incluso en un río tan enorme como el Amazonas, las mareas vivas provocan una vez al mes una ola irresistible de más de 4,5 m de altura, que vence a la corriente del río y penetra tierra adentro a velocidades de 16 a 24 km por hora.

También en el río Hooghly, que desemboca en el golfo de Bengala, se forman importantes olas de marea.

En Inglaterra, la ola de marea más impresionante es la que se forma ciento treinta días al año en el río Severn; durante los equinoccios de primavera y otoño alcanza alturas máximas de hasta 3 m, y puede penetrar tierra adentro más de 32 km, sobrepasando la ciudad de Gloucester.

Hay que señalar que, en general, a todos estos puntos acuden intrépidos practicantes del surf, para gozar de la excitación de cabalgar sobre la ola.

Mediterráneo tiene mareas muy ligeras, en comparación con las que se aprecian en las costas de los grandes océanos.

Para los pequeños animales y plantas que viven en aguas costeras, las mareas son, con toda seguridad, el más potente de los factores ecológicos.

Una lapa, un percebe o un alga aferrados a la zona intermedia entre la pleamar y la bajamar experimentan tremendas variaciones ambientales varias veces al día. Dos veces al día quedan completamente cubiertos por el agua del mar, durante un período variable; otras dos veces quedan al aire libre, expuestos a la desecación por obra del sol y del viento.

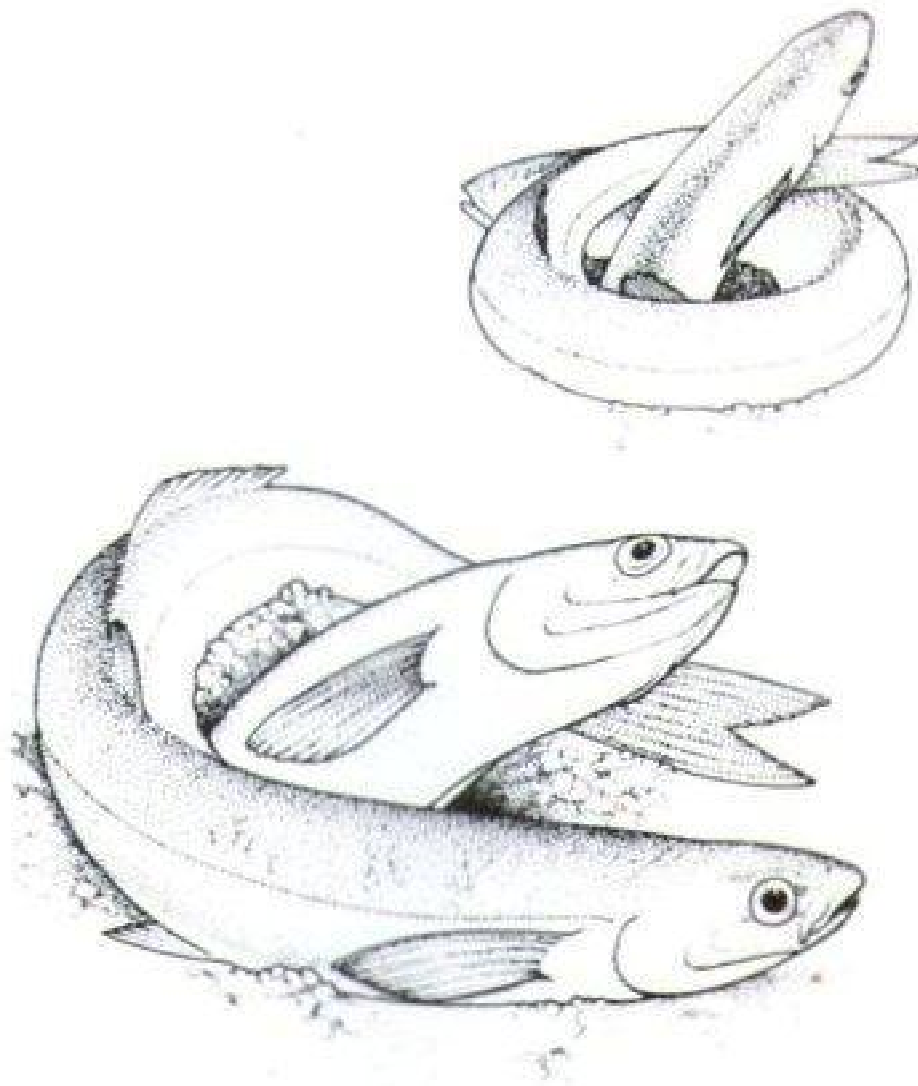
Así pues, estos organismos litorales tienen que ser extraordinariamente adaptables, para poder pasar de un ambiente marino a uno terrestre cada pocas horas. Para adquirir esta adaptabilidad, han desarrollado numerosas especializaciones.

Muchos de ellos se «cierran» al bajar la marea, permaneciendo inactivos y compactos para conservar el agua en el interior de su concha, caparazón o envoltura mucosa. Otros disponen de relojes biológicos, no sintonizados con el sol sino con las mareas, que les permiten quedar protegidos cuando la bajada de la marea los deja expuestos al aire.

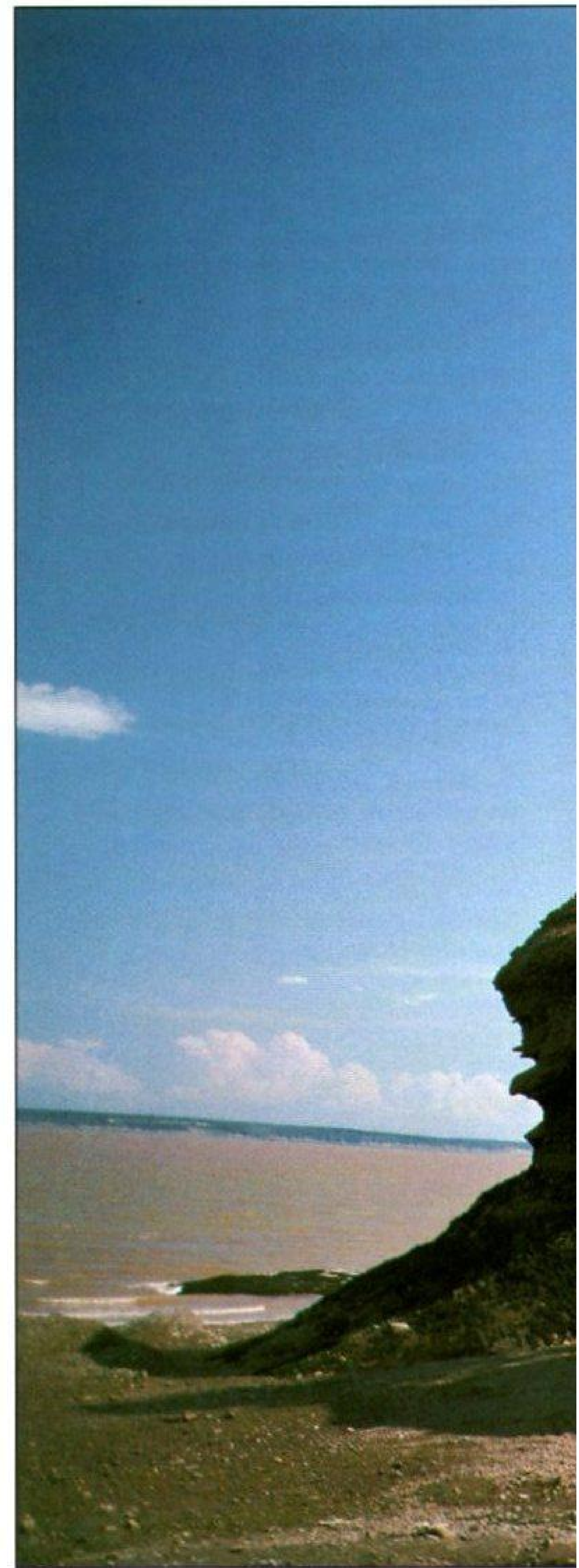
Es evidente que las mareas influyen en estos animales marinos, pero ¿tienen algún efecto directo sobre la existecia humana, aparte de sus obvias implicaciones en la navegación y el medio ambiente? En principio, se podría pensar que la similitud entre el ciclo lunar y mareal, de 28 días, y el ciclo menstrual de la mayor parte de las mujeres, también de 28 días, es demasiado grande para tratarse de una mera coincidencia.

Algunos antropólogos han sugerido, por ejemplo, que nuestra especie pasó una larga parte de su historia en zonas litorales, recogiendo moluscos y otros alimentos, y que el ciclo reproductivo de las mujeres se adaptó al ciclo mareal a causa de esta conexión ecológica.

Sin embargo, la mayoría de los científicos no da crédito a estas teorías. Desde los tiempos más primitivos, las sociedades humanas han prosperado por igual en zonas interiores y en regiones costeras. Aun más revelador es el hecho de que nuestros parientes evolutivos —los monos y antropoides— presenten una gama bastante amplia de ciclos éstricos.



El Leuresthes tenuis *es un pez californiano cuyo ciclo vital presenta una notable conexión con el ciclo lunar. Entre marzo y septiembre, estos peces de 15 cm de longitud nadan hacia la costa para desovar durante el cuarto creciente o la luna llena. Las puestas más grandes tienen lugar coincidiendo con las mareas vivas. Al llegar al nivel de la marea alta, el pez echa a «correr» y las olas lo arrastran a la playa. Las parejas se aparean en la arena, y el macho fecunda los huevos que la hembra va poniendo en un surco de unos 5 cm de profundidad que ha abierto con su cuerpo; luego, los dos regresan al mar. Dos semanas después, en la siguiente marea viva, los huevos enterrados en la arena se abren y las larvas son arrastradas al mar por las olas.*



Las fortísimas mareas de la bahía de Fundy han desgastado las rocas de la costa, dejando grandes «floreros» aislados, que poco a poco se van desmoronando, erosionados por las olas.

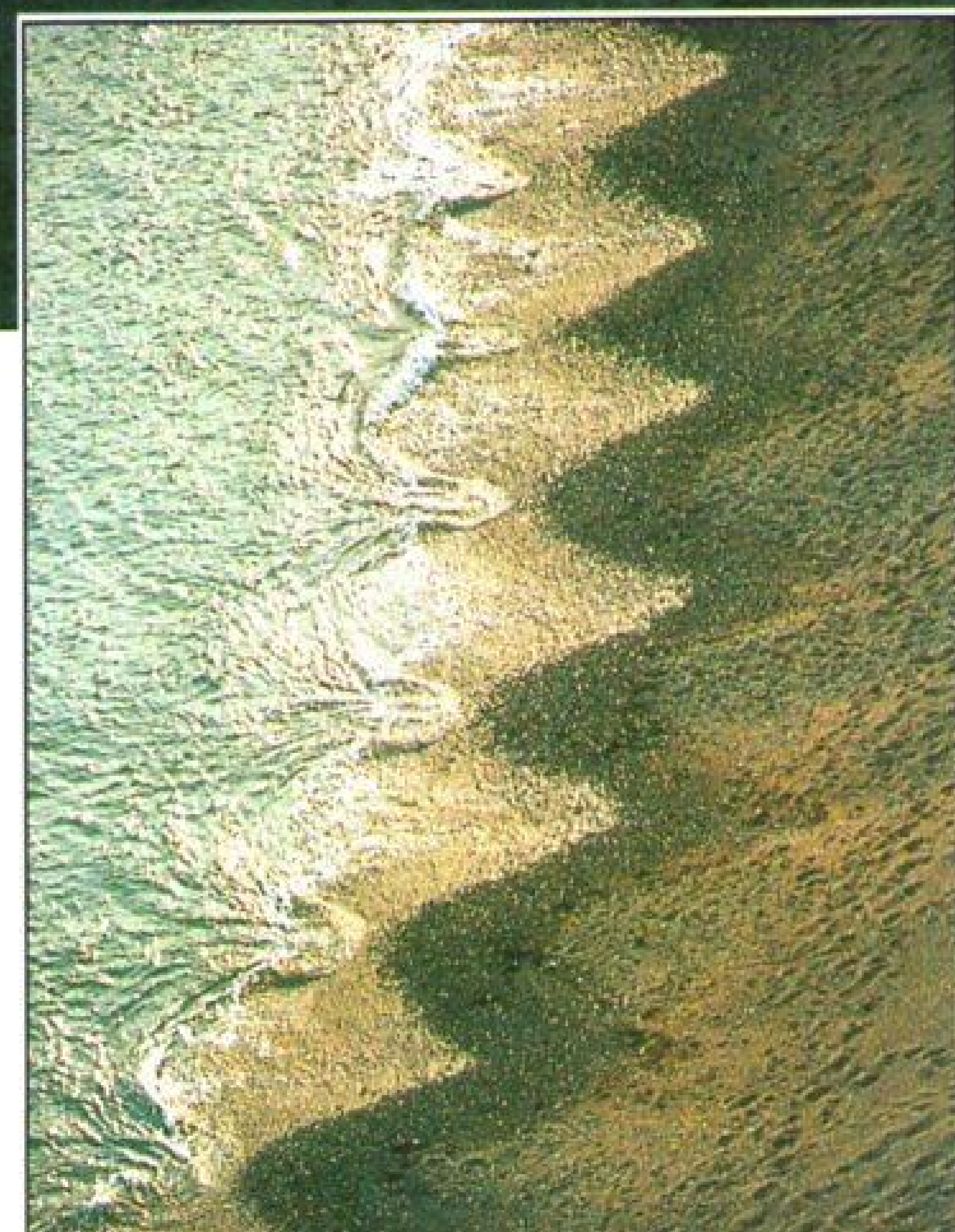
En términos prosaicos, parece que la coincidencia entre las duraciones del ciclo femenino y el de las mareas se debe tan sólo a la casualidad.

No obstante, otros investigadores han especulado que las mareas influyen en la vida humana de un modo mucho más sorprendente y fascinante. Según ellos, el clima de la Tierra puede estar influido no sólo por las mareas oceánicas, sino también por mareas atmosféricas más imperceptibles: una pauta de pequeños cambios de presión provocados por la atracción gravitatoria de la luna y el sol sobre los gases que componen la atmósfera terrestre.

Las posiciones relativas del sol, la luna y la Tierra siguen un ciclo de 18,6 años, lo cual permite predecir sus alineaciones y, por lo tanto, los eclipses. Este mismo tipo

de alineación podría explicar también los ciclos, más o menos de 20 años, que parecen haberse detectado en algunos datos climáticos.

En el Medio Oeste de los EE.UU., por ejemplo, las precipitaciones lluviosas parecen seguir una oscilación de este tipo. Si estas hipotéticas conexiones se confirmaran, no cabría duda de que la proximidad de la luna puede influir en nuestras vidas en maneras que aún no podemos ni imaginar.



En esta playa de Dorset se observa un tipo diferente de erosión. Las fuertes mareas del canal de la Mancha arrastran las piedras hacia arriba y hacia abajo en diagonal, creando en la arena un diseño en forma de sierra.

Invasores del espacio

Durante los años cincuenta, en pleno apogeo de la guerra fría entre Oriente y Occidente, se estrenaron en América y Europa numerosas películas de ciencia-ficción cuyo tema era la invasión de los extraterrestres. Estas películas expresaban temores profundamente arraigados en la mente humana. Los invasores se presentaban bajo formas extrañas y demoníacas, adoptaban infinidad de disfraces y siempre tenían malas intenciones. Y la amenaza no provenía de los países del área comunista, sino del espacio interestelar.

Ninguno de estos invasores del espacio tenía existencia real; pero todos los días llegan a nuestro planeta verdaderos seres espaciales que pasan inadvertidos, a pesar de nuestra fascinación por el tema. Ellos, y los residuos que dejan, son la fuente de numerosos misterios científicos, relacionados entre sí.

Los invasores a que nos referimos son los meteoritos: fragmentos no planetarios de materia sólida que flotan por el espacio del sistema solar y acaban penetrando en el campo gravitatorio de la Tierra. Entonces caen, atravesando la atmósfera a velocidades de hasta 70 kilómetros por segundo. A semejante velocidad, el aire que tienen delante, comprimido por las ondas de choque, se vuelve incandescente.

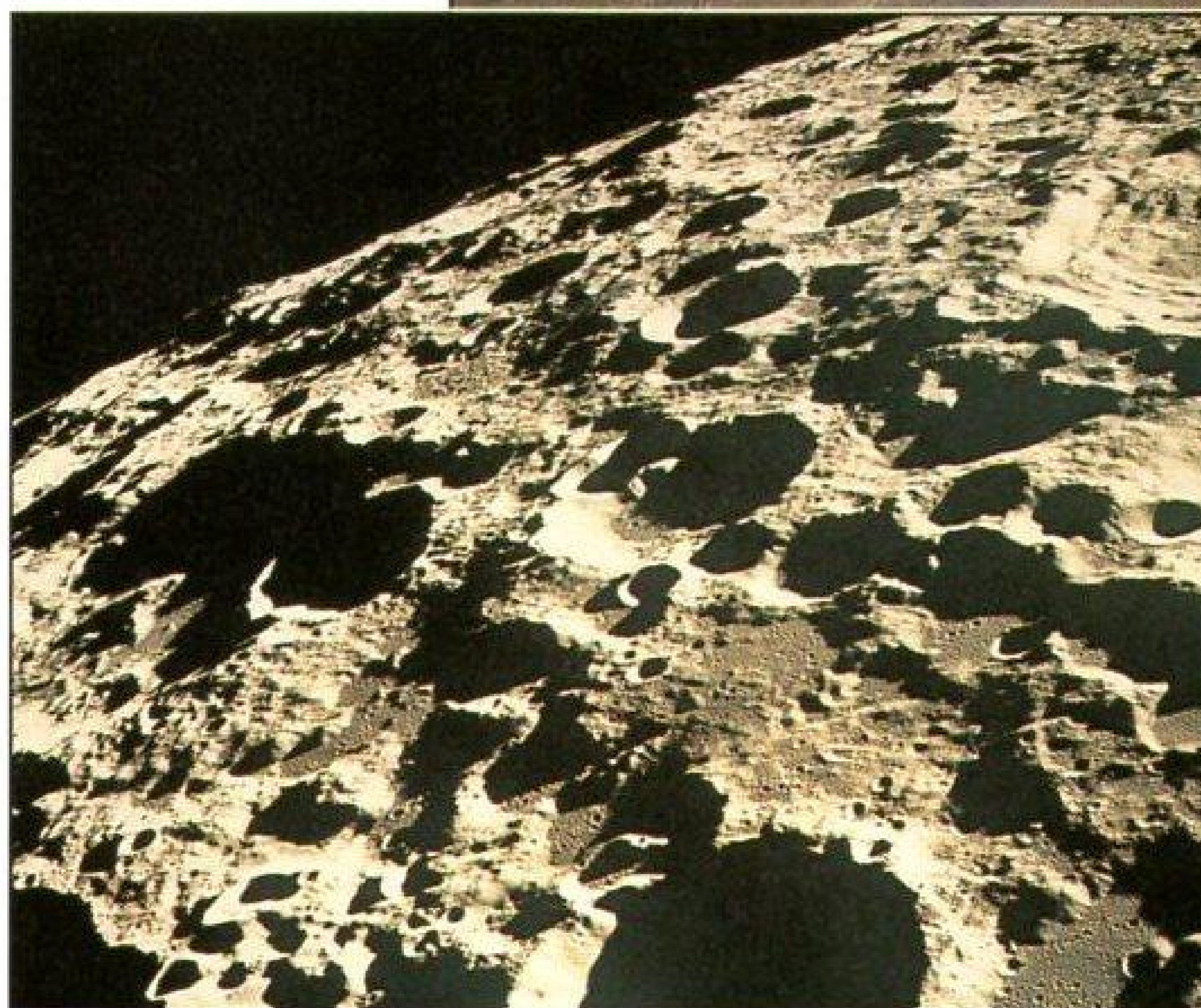
Este aire supercalentado calienta a su vez las capas externas del meteorito, hasta que éste acaba por fundirse. El aire ardiente y el material fundido producen el efecto de «estrella fugaz» que señala la caída del meteoro.

El destino final de estos invasores llameantes depende de su tamaño, composición y trayectoria. Y sus diferentes variantes han dado lugar a una desconcertante proliferación de nombres para describir los objetos y fenómenos.

Un meteoro es lo que la gente común llama una estrella fugaz —una estela brillante que atraviesa el cielo—, mientras que al objeto que cae en llamas se lo denomina bólido o meteoroide. Muchos

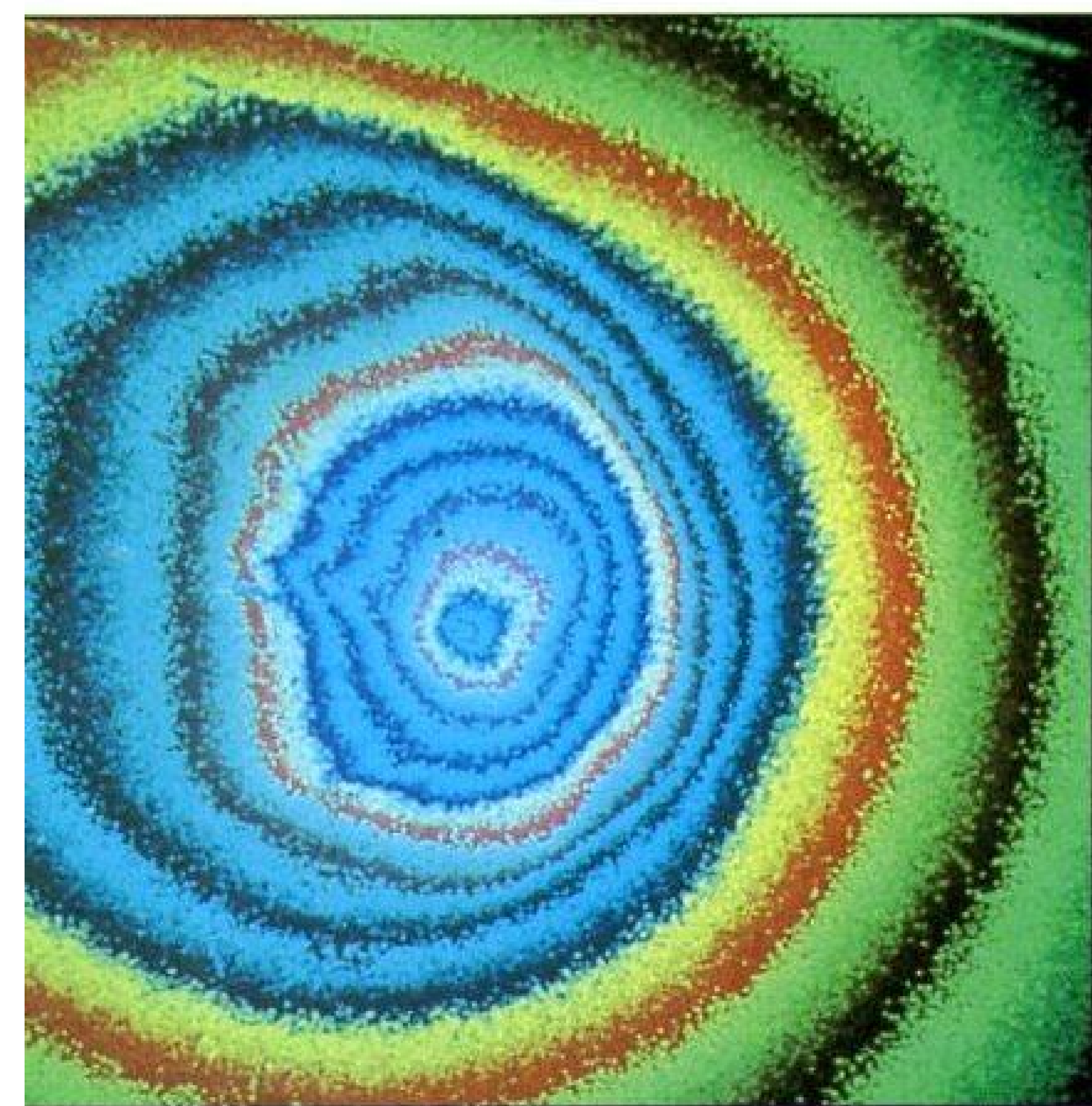


Hace unos 22.000 años, un enorme cuerpo extraterrestre chocó con la Tierra a una velocidad de 48.000 kilómetros por hora. El terrorífico impacto formó el cráter del Meteoro en el desierto de Arizona. La fuerza de la colisión debió ser equivalente a la del estallido de 500.000 toneladas de explosivo de alta potencia.



Los gigantescos cráteres de la cara oculta de la luna dan testimonio de una época caótica, hace millones de años, en la que un constante bombardeo de meteoritos se abatió sobre su superficie.





Arriba: *Imagen procesada del núcleo del cometa Halley, obtenida a partir de cuatro fotografías tomadas desde Helwan, Egipto, en mayo de 1910. Las franjas de color, del verde al azul, indican el aumento progresivo de brillo en el núcleo del cometa.*

Arriba, derecha: *la cola del cometa Halley es una nube de partículas y gas de millones de kilómetros de longitud. También se observa una cola curva del tipo II.*

bólidos pequeños, que penetran en la atmósfera casi verticalmente y a gran velocidad, o que están compuestos de material fragmentable, se funden, vaporizan y desintegran durante el descenso, y no llegan a caer en tierra.

En términos estrictos, sólo se da el nombre de meteoritos a los bólidos que no se queman por completo en la atmósfera y consiguen llegar al suelo. Algunos lo logran gracias a su enorme tamaño inicial, que les permite conservar algo de materia sin fundir antes de caer a tierra. Otros, sobre todo los metálicos, porque son sumamente resistentes; otros, porque penetran en la atmósfera en una trayectoria muy oblicua, que les hace perder velocidad poco a poco, sin calentarse demasiado. Ésta es la misma técnica que emplean las lanzaderas espaciales para regresar a salvo a la Tierra.

La Tierra está sometida a un constante bombardeo de meteoritos y meteoroides. Se ha calculado que cada año llegan a nuestra atmósfera más de 20.000 toneladas de materia del espacio; es decir, más 50 toneladas por día.

Casi toda esta basura interplanetaria está formada por fragmentos de pequeñísimo tamaño, con granos de arena o motas de polvo; los objetos de dimensiones considerables representan tan sólo una fracción minúscula del total. Cuanto más grande sea el objeto, más improbable es que produzca un meteoro.

Sin embargo, improbable no es lo mismo que imposible. Hace unos 50.000 años, mucho antes de que los seres humanos pisaran tierra americana, cayó en el norte de Arizona uno de estos escasísimos meteoritos gigantes: un enorme fragmento de níquel y hierro, con un diámetro probable de 41 metros y un peso aproximado de 300.000 toneladas, que atravesó la atmósfera a unos 19 km por segundo. Debió ser una impresionante bola de fuego, que golpeó el suelo en el cañón del Diablo.

En el punto de impacto, millones de toneladas de tierra y roca salieron proyectadas hacia el cielo, la gigantesca onda de choque aplastó toda la vegetación en kilómetros a la redonda, y el fuego debió destruir toda la materia inflamable hasta una gran distancia del punto de la explosión. El meteorito se desintegró y sus fragmentos se fundieron, vaporizándose en parte.

El resultado del impacto es el cráter de Barringer, o cráter del Meteoro, de más de kilómetro y medio de diámetro, descubierto



por los europeos en 1891, aunque los indios de la región debían conocerlo desde mucho tiempo antes.

En el momento de formarse, debía tener unos 230 metros de profundidad, pero desde entonces la erosión lo ha reducido a unos 177 metros. Se han encontrado restos del meteorito de ferroníquel debajo del cráter y en un radio de 10 kilómetros en torno al mismo.

¿De dónde proceden estos objetos, tan potentes como una bomba termonuclear? La mayoría de las respuestas a este enigma tienden a considerarlos residuos de las primeras etapas de formación del sistema solar, ya que la mayoría de los meteoritos contienen cristales minerales que, según las dataciones científicas, se formaron hace 4.600 millones de años, cuando los granos de polvo interestelar de la nube —o nebulosa— de la que surgiría el sistema solar se condensaron en pequeños cuerpos denominados planetesimales.

Durante las primeras fases de la evolución del sistema solar, estos cuerpos se encontraban en constante estado de colisión, aglomeración y fragmentación. En los agregados más grandes, al calentarse, se producía una diferencia en la densidad de su

Caídas de meteoritos

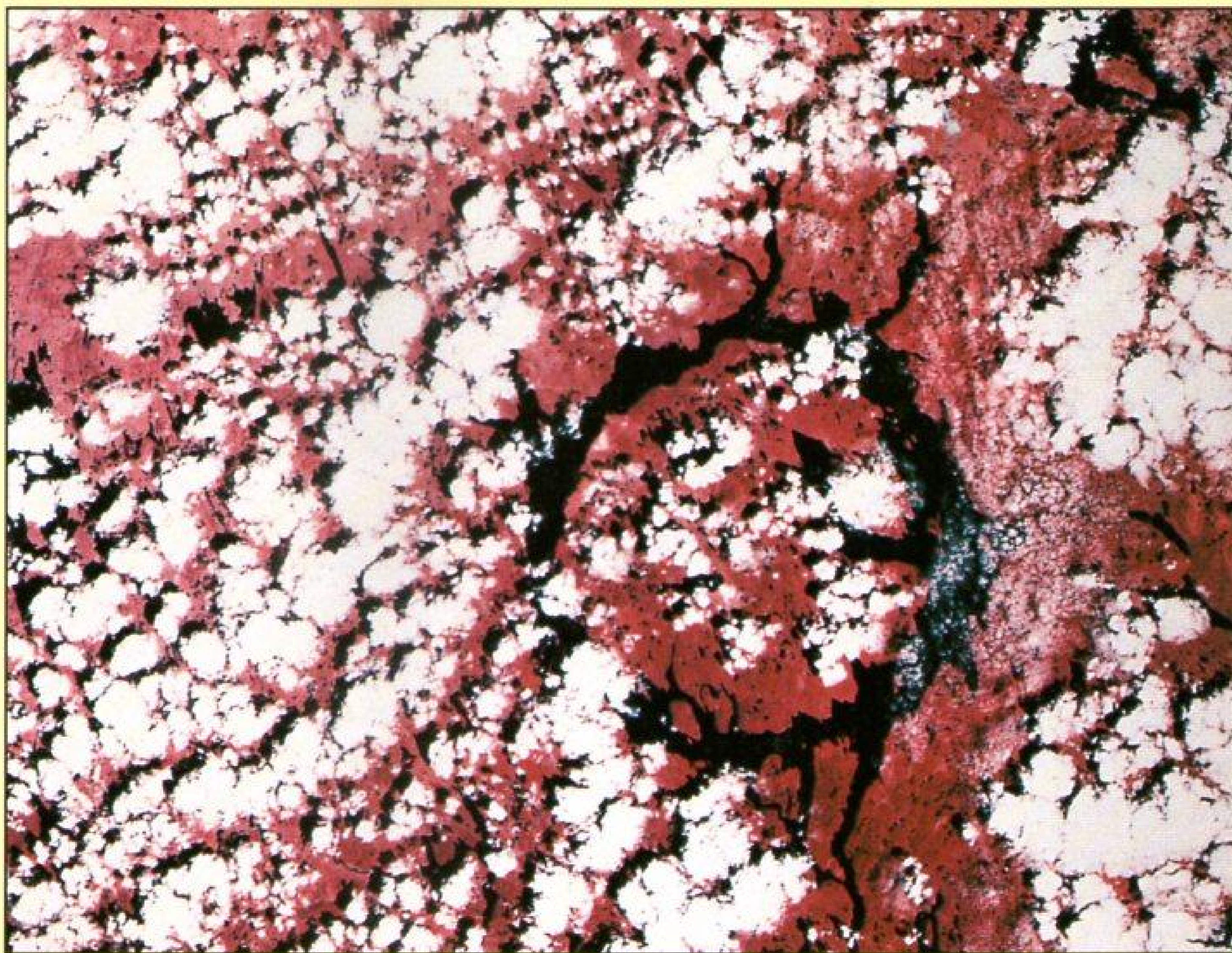
El cráter del Meteoro, en el norte de Arizona, marca un acontecimiento relativamente reciente en la historia de la Tierra. Los estudios geológicos han dado a conocer cráteres mucho más antiguos, tan cambiados y erosionados a lo largo del tiempo que resultan difíciles de identificar. Uno de ellos es el de Duolun, descubierto hace muy poco cerca del río Luan, en la frontera entre las provincias chinas de Hei y Mongolia Interior, al norte de Pekín. Los geólogos opinan que el meteorito que formó este cráter, de 70 km de diámetro, cayó hace aproximadamente 136 millones de años, durante la transición del jurásico al cretácico.

Aún más antiguo es el enorme cráter de Manicouagan, cerca de Quebec, Canadá, que se formó hace unos 210 millones de años y mide 75 km de diámetro. Se ha calculado que un impacto tan tremendo como para producir semejante cavidad debió fundir unos 1.000 km^3 de roca, desprendiendo una energía equivalente a la de todos los terremotos en el mundo en mil años.

Accidentes como los de Manicouagan y Duolun tuvieron que trastornar el clima del mundo entero. El polvo y las cenizas levantados por las explosiones debieron provocar el equivalente de un invierno nuclear, bloqueando la luz del sol y ocasionando la muerte de las plantas. Incluso es posible que la extinción de los dinosaurios se debiera a la caída de un meteorito: al disminuir las plantas, los grandes reptiles se encontraron sin alimento y no pudieron reproducirse eficazmente.

También es posible que la caída de meteoritos provocara la formación de esos extraños materiales llamados tectitas, que se encuentran por todo el mundo, pero sobre todo en cuatro extensas zonas de Australasia, América del Norte, Checoslovaquia y Costa de Marfil (África Occidental). Por lo general, las tectitas sólo pesan unos pocos gramos, y en ciertos aspectos se parecen al vidrio volcánico, pero la mayoría de los científicos opina que se trata de fragmentos de tierra fundida, proyectados por el tremendo impacto de un meteoro. Esta teoría podría explicar el aspecto de muchas tectitas, que muestran claras señales de haberse fundido, a consecuencia del calor de la fricción con la atmósfera.

El impacto que formó el cráter de Manicouagan desprendió tanta energía como todos los terremotos que se han producido en el mundo durante mil años juntos.



estructura, y los silicatos rocosos emergían a la superficie, mientras los materiales más densos, como el hierro y el níquel, se hundían hacia el interior. Cuando una colisión fragmentaba estos planetesimales, en algunos fragmentos predominaba el metal y en otros la roca.

Poco a poco, los planetas que se iban formando en el sistema solar atrajeron por gravitación a casi todos los planetesimales. Los que quedaron después de esta «limpieza» se concentraron principalmente en el llamado cinturón de asteroides, situado entre las órbitas de Marte y Júpiter; los asteroides son escombros planetesimales.

De vez en cuando, la inmensa fuerza gravitatoria de Júpiter altera la órbita de un asteroide, lanzándolo en una trayectoria excéntrica que puede cruzarse con la de la Tierra. Cuando esto sucede, el escombro puede convertirse en un meteorito, que puede ser rocoso, metálico o mixto, según el tipo de planetesimal del que se deriva.

La caída de meteoritos sobre los planetas y satélites era mucho más frecuente durante los primeros quinientos millones de años de existencia del sistema solar, cuando los mismos eran mucho más numerosos que ahora.

Otra posible fuente de material meteórico son los cometas. Los cometas son como bolas de nieve sucia, masas compactas de hielo, polvo y pequeños fragmentos rocosos. Se desplazan en órbitas muy elípticas que los acercan mucho al sol para luego llevarlos a los confines del sistema solar, en ocasiones más allá de la órbita de Plutón, el planeta más lejano.

Algunos astrónomos creen que los cometas se forman en un enorme conjunto de masas de hielo, la nube de Oort, que suponen que existe más allá de los planetas, desde donde se proyectan hacia el interior del sistema solar.

Los cometas son invisibles hasta que su núcleo empieza a resultar afectado por la radiación solar en la parte de su órbita que los acerca al sol. Al calentarse el cometa, de su núcleo se desprende una nube de polvo y gas llamada coma. Cuando se acerca aun más al sol, se forma una cola que, por efecto del viento solar, apunta siempre en dirección contraria al sol: detrás del cometa cuando éste viaja hacia el sol, delante cuando se aleja de él.

Las colas del tipo I son largas y rectas; las del tipo II son más cortas y curvas, y están compuestas por minúsculas partículas de materia, separadas de la coma por la presión de la radiación.

Los cometas periódicos pueden tener períodos orbitales muy distintos. Los cometas de período corto aparecen cada 20 años o menos; los de período medio, cada 20-60 años; y los de período largo, a intervalos de más de 60 años. El cometa Halley es el más conocido de los cometas de período largo.

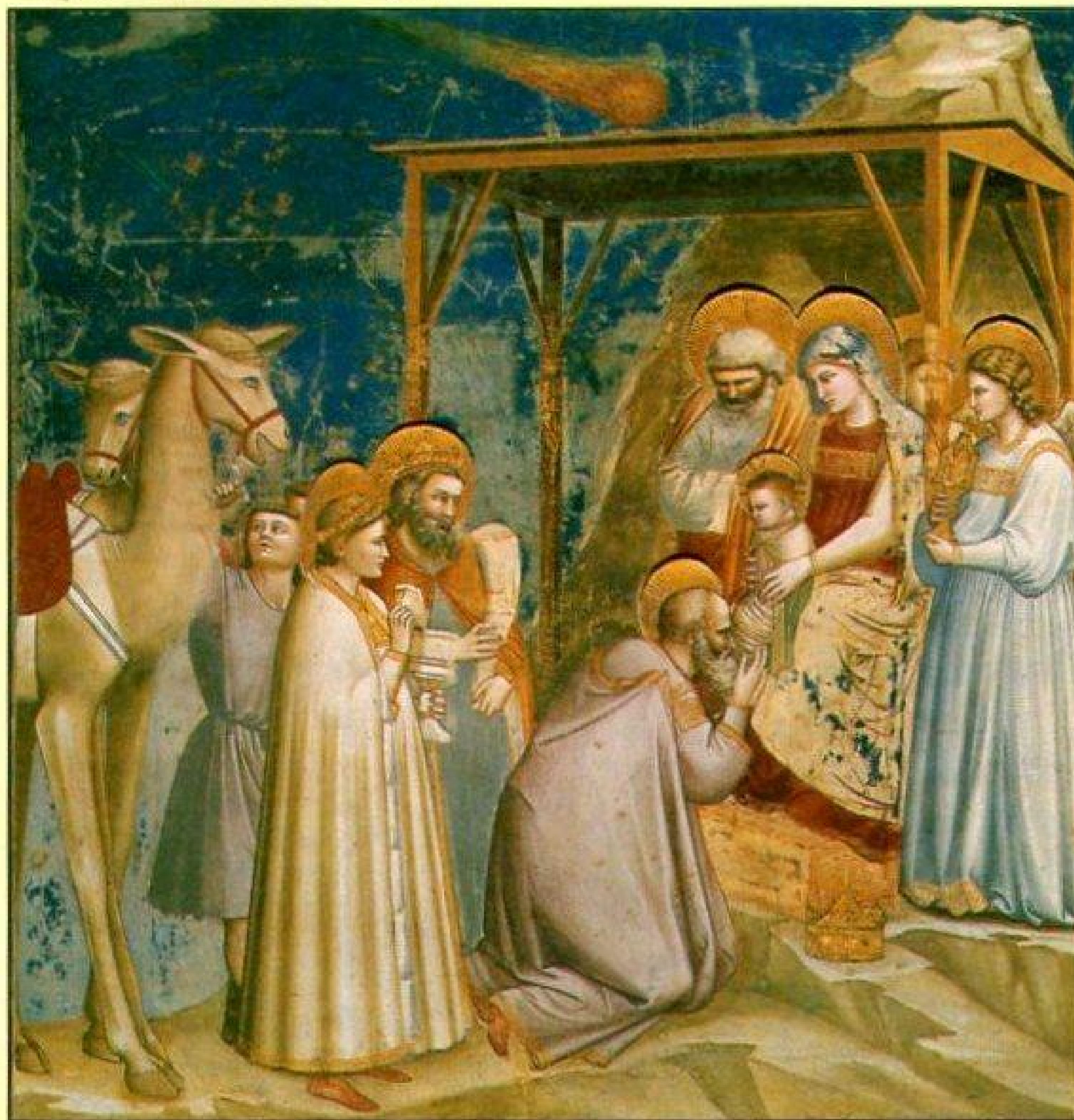
Los cometas de período corto no llegan más allá de la órbita de Júpiter; los de período largo llegan mucho más allá de la de Neptuno.

Con cada órbita, el sol hace hervir parte del material del núcleo del cometa, hasta que al final no queda más que una nube de fragmentos rocosos que recorre el espacio. Si cruzan la órbita de la Tierra, pueden producir lluvias de meteoros.

Parece plausible que, de vez en cuando, todo el núcleo de un cometa entre en colisión con la Tierra. El fenómeno de Tunguska —una tremenda explosión que tuvo lugar en Siberia en 1908, aplastando los árboles de una extensa zona, pero sin formar cráter— pudo deberse a un núcleo helado que explotara en la atmósfera sin dejar apenas residuos.

Este suceso, como otros muchos aspectos de las invasiones meteoríticas procedentes del espacio, constituye un misterio, cuya causa puede que no lleguemos nunca a desentrañar.

Asiduo visitante del espacio



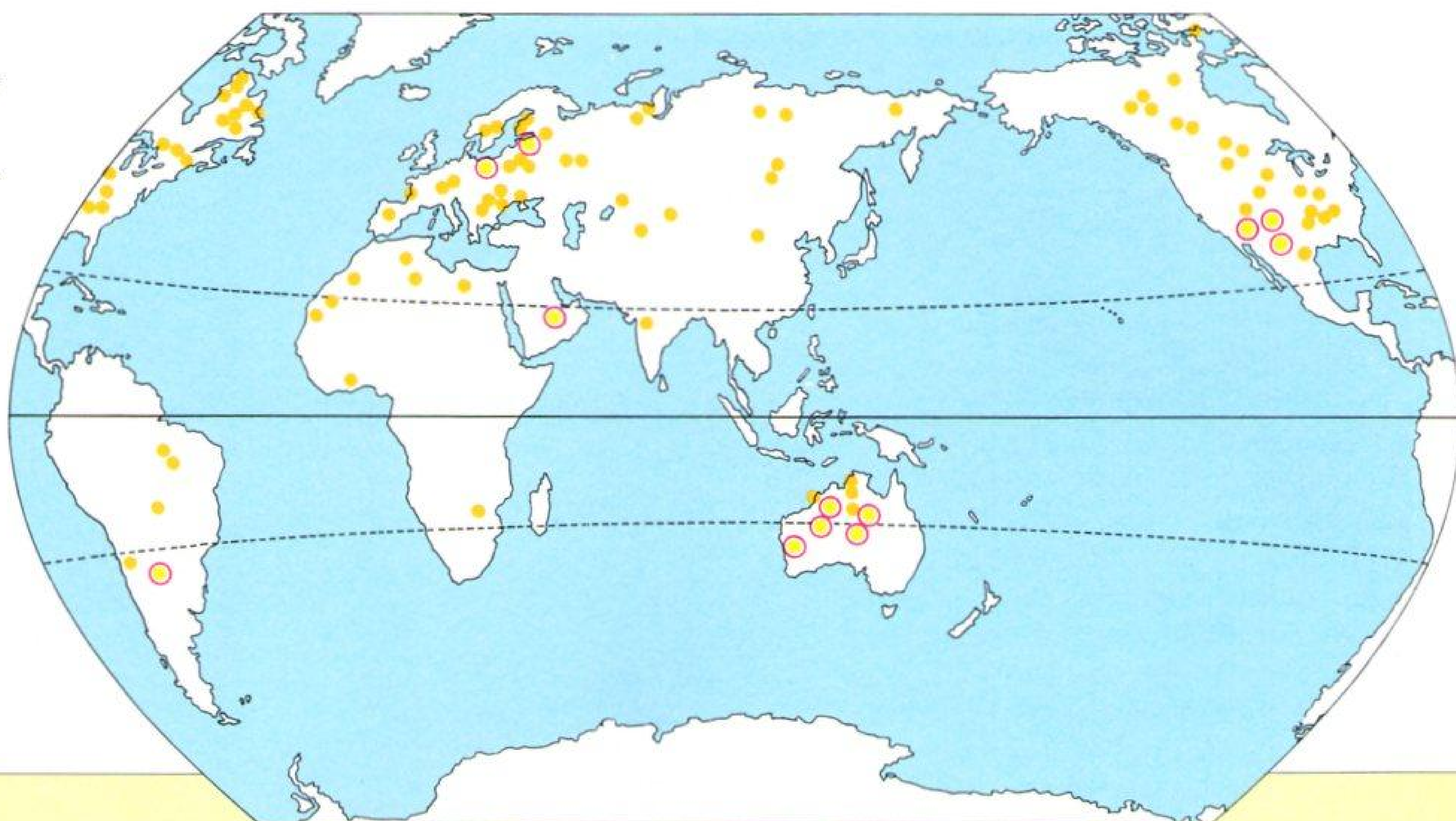
El pintor florentino Giotto vio un cometa en 1301 y lo incorporó, como la estrella de Belén, en su fresco La adoración de los magos, *realizado tres años después para la capilla Arena de Padua. El evangelio de Mateo, el único que menciona la «estrella de Oriente», se escribió hacia el año 66, coincidiendo con una de las visitas del cometa. Es posible que el evangelista lo incluyera en el relato influido por su propia experiencia.*

El cometa Halley es el más conocido de los cometas periódicos, a causa de su brillo excepcional y su larga y espectacular cola. Además, nos visita cada setenta y cinco-setenta y seis años, prácticamente una vez en la vida de cada persona. Se lo vio por última vez en 1986, y su anterior visita tuvo lugar en 1910.

El inglés Edmond Halley (1656-1742) fue el primero en darse cuenta de que el cometa que se vio en 1682 era el mismo que se había visto en 1607 y en 1531. Comprendiendo que el cometa tenía un período orbital regular, predijo que se vería de nuevo en 1758-1759. Su profecía se cumplió, aunque él no vivió lo suficiente para volver a ver el cometa que ahora lleva su nombre.

Las apariciones del cometa Halley han quedado registradas a lo largo de la historia, y con frecuencia se ha pensado que presagiaban grandes acontecimientos. La primera re-

Cada día penetran en la atmósfera terrestre cientos de miles de meteoritos. La mayoría se queman, formando «estrellas fugaces». Otros caen sobre la tierra con una fuerza tremenda. Aunque sólo conocemos 13 grandes cráteres formados por meteoritos, se han localizado cientos de puntos de impacto, sobre todo en América del Norte, Europa y Australia.



Probable impacto de meteorito

Impacto de meteorito confirmado

ferencia es china y corresponde al año 240 a. C. Nos visitó también en los años 12 a. C. y 66 d. C., y no, como a veces se ha dicho, el año del nacimiento de Jesucristo.

La identificación popular de la Estrella de los Reyes Magos con el cometa Halley se debe en parte a la famosa Natividad pintada por Giotto di Bodoni (1267-1337). Giotto había visto el cometa en 1301, cuando traía una cola especialmente larga y brillante.

Su representación artística del cometa recibió el debido homenaje en 1986, con el lanzamiento de la sonda espacial europea *Giotto*, que penetró en la coma del cometa Halley, enviando a la Tierra imágenes detalladas, aunque no salió intacta del encuentro.

Pero la primera aparición del cometa en un contexto artístico tuvo lugar en el famoso tapiz de Bayeux, que conmemora la conquista de Inglaterra por Guillermo de Normandía en 1066. La visión del cometa es saludada por los normandos como un buen presagio, mientras que los ingleses y su rey Haroldo aparecen temblando de miedo.

El tapiz de Bayeux es, en realidad, una tela bordada en la que aparece el cometa Halley en forma estilizada, pero perfectamente reconocible.



Los daños sufridos por la sonda Giotto, reproducidos en esta simulación por ordenador del impacto de partículas de polvo a alta velocidad contra una plancha de metal.



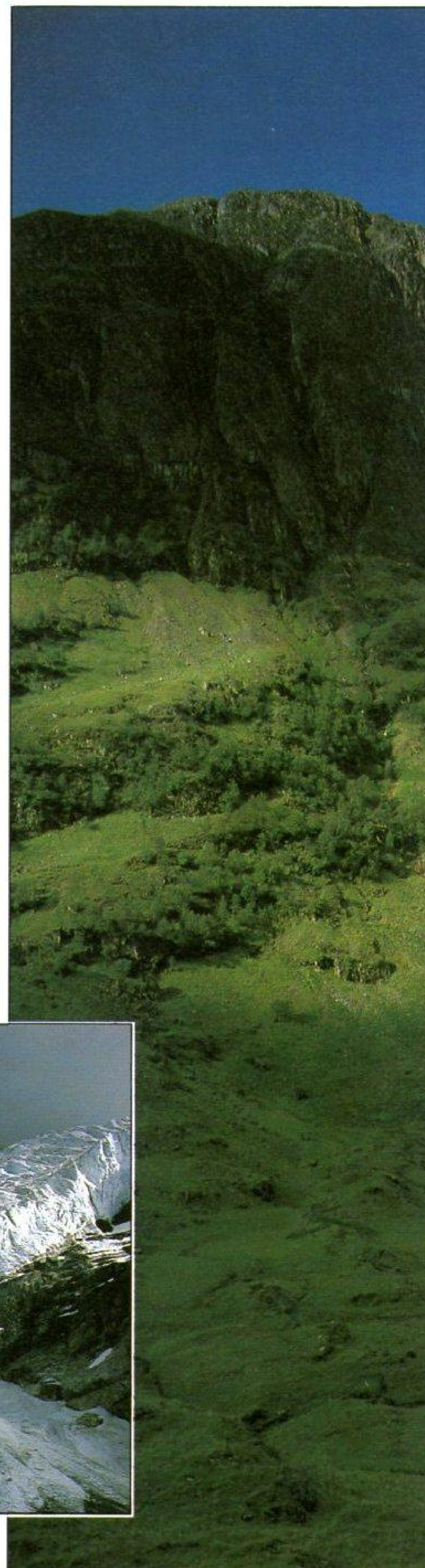
Ciclos del hielo

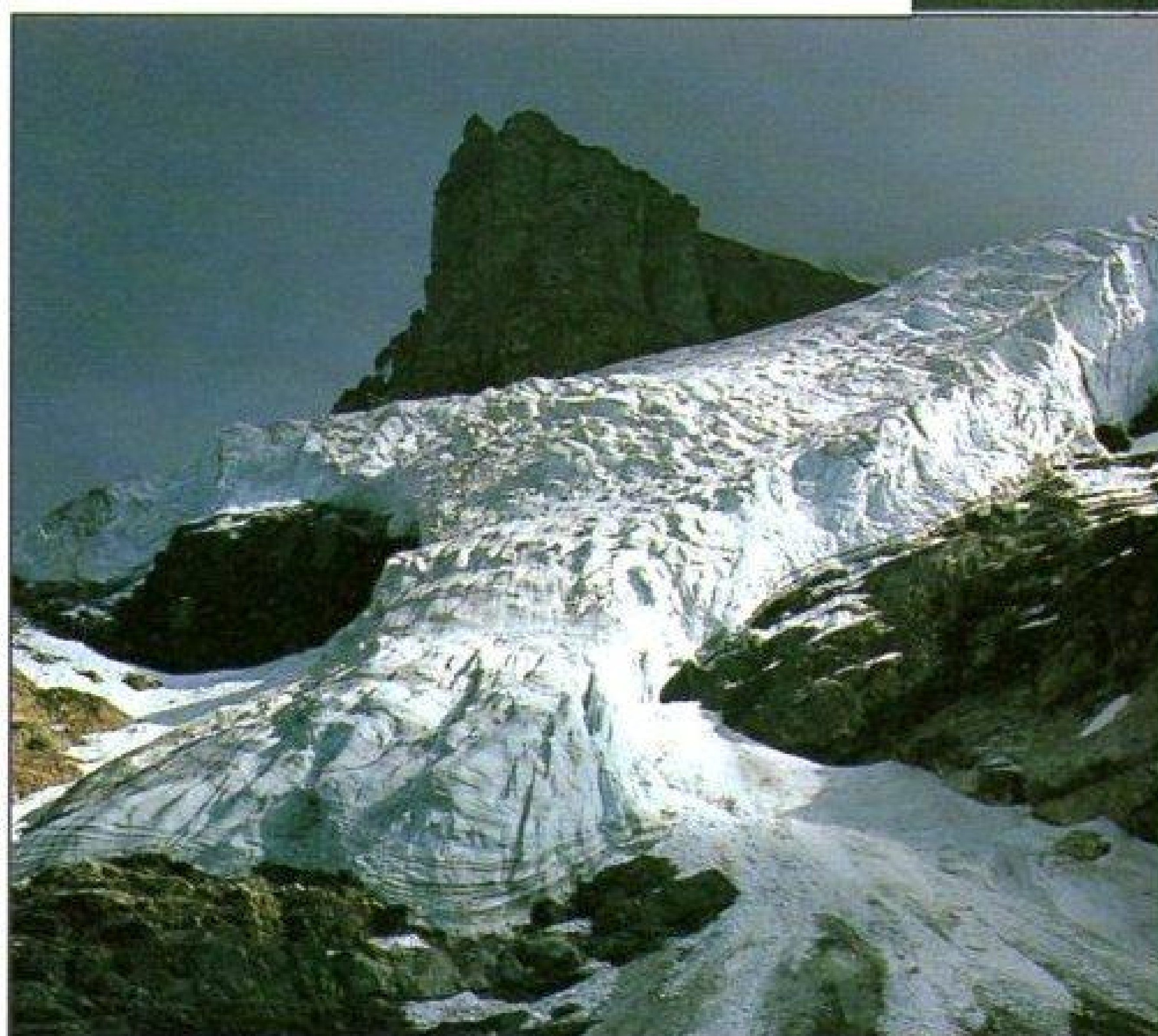
El temor al «efecto invernadero», provocado por el dióxido de carbono desprendido al quemar combustibles fósiles, es una de las ansiedades más extendidas en el mundo desarrollado. Casi cualquier muchacho en edad escolar es capaz de disertar con conocimiento acerca del cambio climático global y los factores que influyen en él. Al plantearnos la posibilidad de que estemos provocando cambios irreversibles en los sistemas climáticos de nuestro mundo, adoptamos una perspectiva global y totalizante. Esta nueva actitud concede gran importancia a la investigación de los cambios climáticos ocurridos en el pasado, ya que en ellos podríamos encontrar pistas que nos ayudaran a comprender mejor los cambios actuales.

Desde la aparición de la especie humana, durante los últimos millones de años, el misterio climático más profundo e intrigante ha sido la alternancia de períodos glaciales e interglaciales. ¿Qué son las glaciaciones? ¿Qué las provoca? ¿Cómo se inician y por qué terminan? Está claro que si lográramos desentrañar los mecanismos de estos misterios obtendríamos un conocimiento del clima de la Tierra.

Durante la mayor parte de los últimos tres millones de años —el período pleistoceno— se ha producido una rítmica sucesión de eras glaciales, separadas por períodos más cálidos y húmedos, denominados interglaciales. En general, cada período glacial ha durado unos 100.000 años; los interglaciales han sido, por término medio, más cortos: de 10.000 a 20.000 años. En la actualidad, nos encontramos en un período interglacial relativamente cálido; el último período glacial terminó hace unos 10.000 años.

Si nos remontáramos con la imaginación hasta 20.000 años atrás, durante la última glaciación, encontraríamos un hemisferio norte completamente diferente del que conocemos. El océano Ártico y gran parte de Norteamérica y del norte de Eurasia se encontraban sepultados bajo grandes masas de





Por todas partes se pueden advertir huellas de las glaciaciones del pasado. El banco de hielo más extenso que existe fuera de las regiones polares es el de Columbia (abajo), *en las montañas Rocosas de Canadá. Cuando estos enormes glaciares descienden por sus valles, la fuerza erosiva desgasta las paredes rocosas, ensanchando y haciendo más profundo el valle, que adquiere una característica forma de U, como la del valle del río Coe —Glen Coe— en Escocia* (a la derecha).



hielo. En el Nuevo Mundo, los hielos se habían extendido desde sus orígenes polares hasta cubrir Alaska, las regiones orientales de Canadá, gran parte del noroeste y todo el Medio Oeste y Nueva Inglaterra.

Al otro lado del Atlántico, las masas de hielo habían avanzado desde Escocia y Escandinavia, cubriendo casi toda Gran Bretaña y el norte de la Europa continental. De los casquetes de hielo de los Alpes y los Pirineos descendían brazos que se adentraban en el territorio circundante. Y rodeando todos estos bancos de hielo, que se extendían a partir de las montañas en gigantescos glaciares, había extensas zonas de tundra helada. Estas tremendas alteraciones del paisaje ocasionaron, a su vez, importantes adaptaciones en los seres vivos: el gran mamut lanudo, adaptado a un ambiente polar, pastaba en tierras que ahora disfrutan de un clima mediterráneo.

¿Qué influencias hacen oscilar el clima de nuestro planeta entre este mundo helado y el actual? Los científicos opinan que estos misteriosos ritmos climáticos se deben a cambios muy lentos y graduales en la orientación de la Tierra con respecto al sol, causa última de todo el clima terrestre. En el contexto de nuestra actual preocupación por el efecto invernadero, lo más importante es que estos factores astronómicos parecen influir también en un mecanismo de autocontrol de la temperatura planetaria, en el que interviene el dióxido de carbono, principal agente del efecto invernadero.

Nuestros conocimientos sobre los importantes ritmos astronómicos que afectan al clima se basan en estudios realizados hace más de un siglo por James Croll (1821-1877). Croll fue un escocés autodidacta, que trabajó como agente de seguros y como conserje, y acabó siendo miembro de la Royal Society, la más eminente institución científica británica. En la década que precedió a la segunda guerra mundial, sus estudios fueron puestos al día por el astronómo yugoslavo Milutin Milankovitch (1879-1958), que les dio forma moderna.

El modelo Milankovitch, como ahora se lo llama, propone tres alteraciones rítmicas en la actividad espacial de la Tierra. Estas alteraciones se repiten a diferentes intervalos y podrían dar lugar a ciclos de relativo enfriamiento en las altas latitudes de la Tierra. La primera consiste en un bamboleo del eje de rotación de la Tierra, como si fuera un huso de hilar, con un período de unos 20.000 años. La segunda es un cambio cíclico en la inclinación del eje de rotación, con un período de 41.000 años. Y por último, existe una oscilación más larga y complicada, con períodos de 100.000 y 400.000 años, provocada por el cambio de forma de la órbita terrestre alrededor del sol.

Concienzudos análisis matemáticos de las interacciones de estos tres efectos han demostrado que podrían provocar ciclos apreciables de enfriamiento a altas latitudes. Las pautas definidas por este modelo teórico coinciden con bastante exactitud con las obtenidas en estudios sobre los cambios de temperatura, basados en la proporción de isótopos de oxígeno encontrada en sedimentos del fondo marino cuya edad se conoce. Aplicando los resultados de estos estudios se ha comprobado que los ciclos de avance y retirada de los hielos confirman en cierto modo el modelo Milankovitch, con sus ciclos de 20.000, 41.000 y 100.000 años.

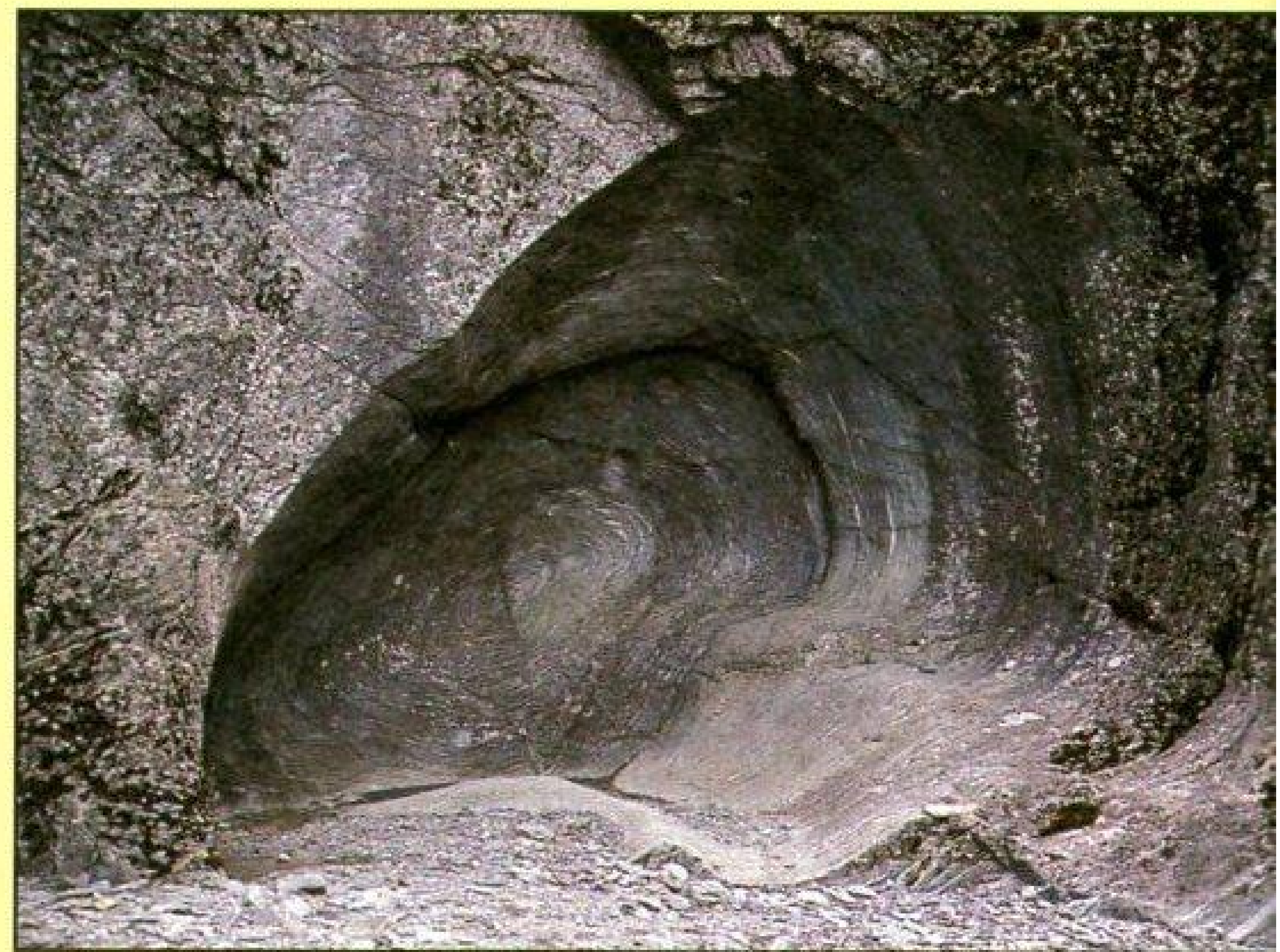
Siguiendo la pista isotópica de los cambios climáticos en sedimentos de ocho millones de años de antigüedad, se han encontrado ciclos similares. Pero aparecen desconcertantes variaciones en las pautas, por lo que no se puede decir que los ciclos astronómicos explican los períodos glaciales.

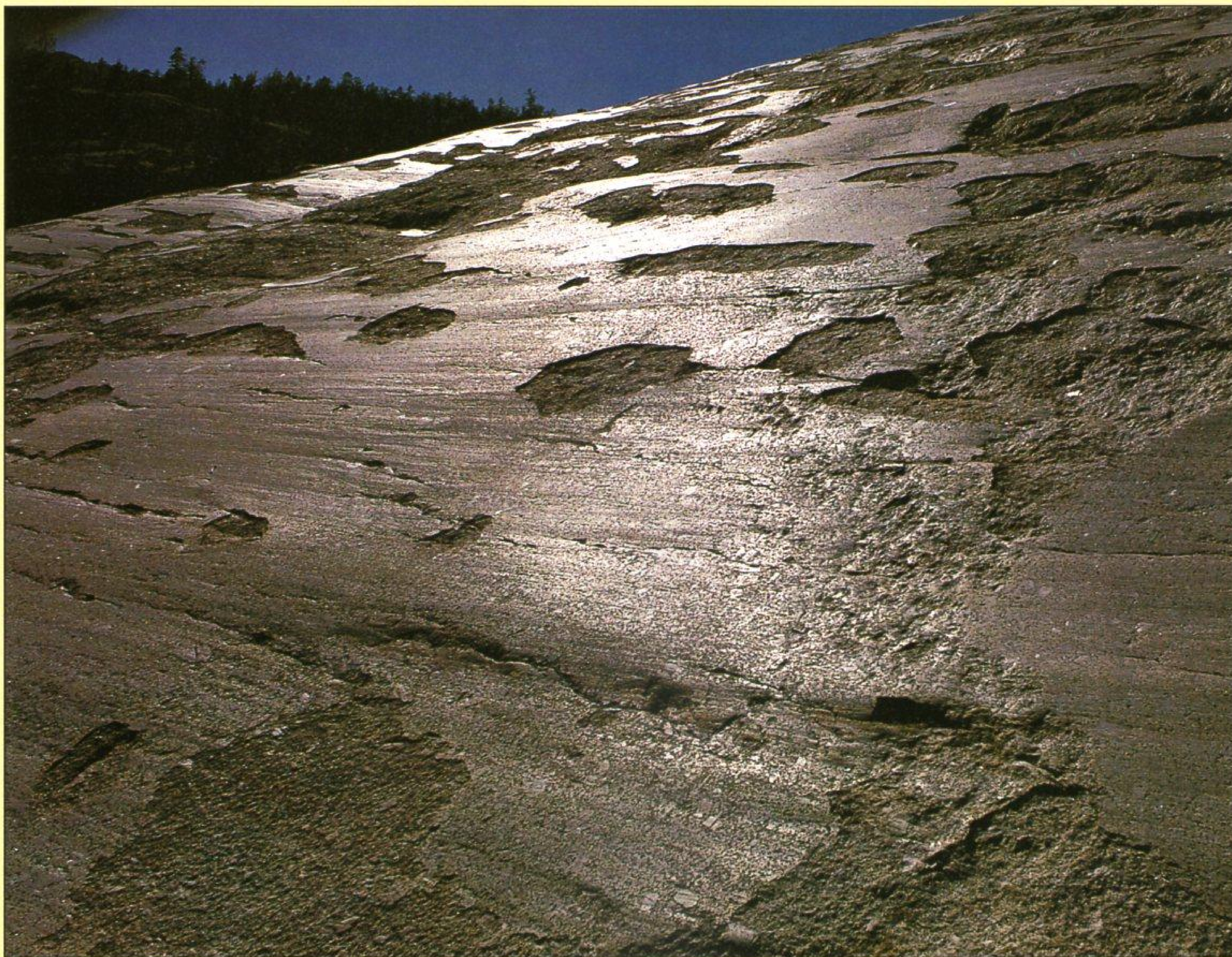
Según otras teorías, los períodos glaciales

Erosión glacial

Las huellas de glaciación más evidentes corresponden al período pleistoceno, en el que adquirieron su forma actual muchos paisajes, sobre todo en el hemisferio norte. La caverna de 4 metros de altura formada en la cabecera del glaciar Francisco José, en Nueva Zelanda (abajo) es una muestra de la erosión ejercida por el hielo sobre la roca. También las paredes del valle presentan señales del arrastre de hielo y grava, que ha dejado una huella permanente de su paso (más a la derecha). Las huellas dejadas por los glaciares desaparecidos oscilan desde inmensos peñascos, llamados bloques erráticos, hasta morrenas y acúmulos caóticos (arriba), que pueden formar montículos de hasta 90 metros de altura y kilómetro y medio de longitud, llamados drumlins.







podrían haberse iniciado a consecuencia de una serie de erupciones volcánicas. Las enormes cantidades de polvo arrojado a la atmósfera por las erupciones podrían reducir de manera significativa la cantidad de energía solar que llega a la superficie de la Tierra, con el consiguiente enfriamiento.

El estudio de los gases atrapados en el hielo de los casquetes actuales puede indicarnos los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera de hace cientos de miles de años. Este registro de los anteriores niveles potenciales del efecto invernadero abarca muchos períodos glaciales e interglaciales. Las correlaciones que de él se deducen son preocupantes, si no aterradoras.

Parece que en la etapa más fría del último período glacial, hace 20.000 años, el nivel de dióxido de carbono en la atmósfera era mucho más bajo que hace 200 años, antes de que el empleo industrial de combustibles fósiles lo elevara artificialmente. Un nivel tan bajo implica muy poco calentamiento de tipo «invernadero», y parece sugerir que los factores de Milankovitch están relacionados con los sistemas climáticos terrestres por medio de un efecto invernadero basado en el dióxido de carbono.

Ignoramos cómo funciona esta conexión, pero algunos científicos creen que depende de las variaciones en el nivel de dióxido de carbono provocadas por la fotosíntesis del fitoplancton oceánico, un proceso que depende de la cantidad de luz solar disponible. Si es verdad que la maquinaria climática del planeta dispone de un termostato basado en el dióxido de carbono, estamos corriendo un grave peligro de anular dicho sistema de control al quemar los combustibles fósiles, talar los bosques y contaminar los mares.

Cuanto más averigüemos sobre los misterios de los cambios climáticos naturales en eras pasadas, más capacitados estaremos para predecir los cambios que se avecinan en el incierto futuro, influido por la actividad humana.

La Tierra inquieta

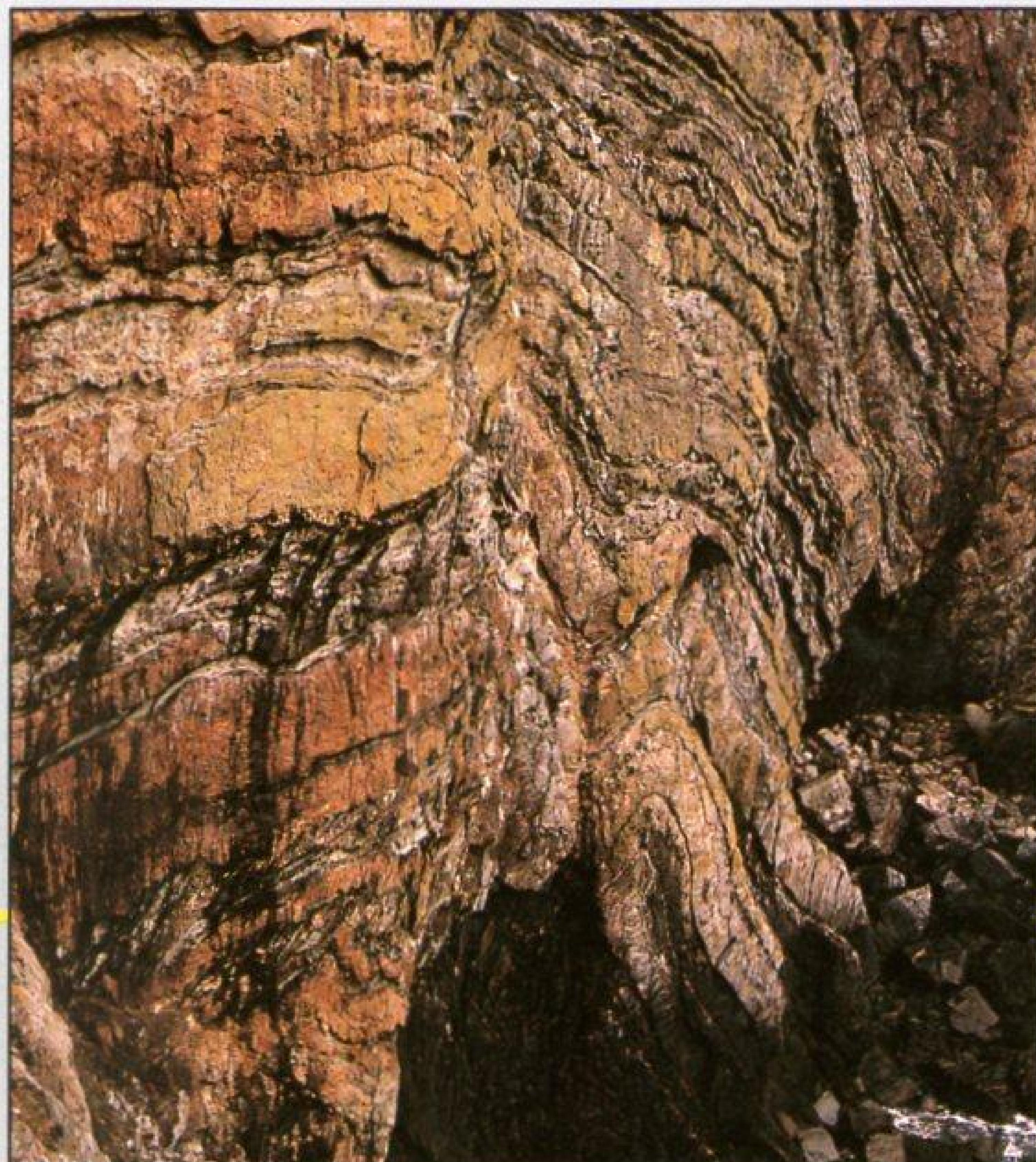
El mundo en que vivimos cambia en todos sus aspectos, día a día y mes tras mes. Algunos cambios son imperceptibles; otros, espectaculares e incluso devastadores. Los continentes, aparentemente tan estables, en realidad se mueven muy despacio y puede que estén empezando a fragmentarse. Más de 800 volcanes horadan la corteza del planeta; muchos de ellos forman un «cinturón de fuego» en torno al océano Pacífico. De las profundidades de la Tierra surgen impresionantes chorros de vapor y agua hirviente; los terremotos hacen temblar el planeta, olas gigantescas arrasan las islas del Pacífico. Son fenómenos que nos resultan familiares, aunque sólo sea en los titulares de los periódicos. Sin embargo, todavía existen muchas preguntas sin respuesta. ¿Por qué la tierra está distribuida de manera tan desigual entre los hemisferios norte y sur? ¿Qué provoca la erupción de los volcanes? ¿Por qué existe tanta actividad geotérmica en Islandia, uno de los países más fríos del mundo?

Los geólogos que buscan la explicación de estos misterios están en deuda con dos grandes conmociones intelectuales que cambiaron de manera radical nuestra imagen del mundo. La primera tuvo lugar hace doscientos años y estableció las bases de la geología moderna. La segunda se inició en los años sesenta y sus ecos aún resuenan en el mundo académico. Nos referimos a la teoría de las placas tectónicas —conocida vulgarmente como deriva continental—, que ha proporcionado un copioso y convincente conjunto de explicaciones a varios fenómenos geológicos hasta ahora inexplicables.

El iniciador de la primera oleada de ideas revolucionarias que vivió la geología fue el escocés James Hutton (1726-1797), que fue el primero en sugerir que la historia geológica de nuestro planeta ha sido un proceso continuo. En otras palabras, que los fenómenos que ahora vemos actuar han actuado siempre, y que con ellos basta para explicar la arquitectura que observamos en nuestro mundo.

Las teorías de Hutton —publicadas por primera vez en 1785— están consideradas por los historiadores como la base primordial de las ciencias geológicas modernas. Fue el primero en darse cuenta de que la erosión actúa sobre los continentes, arrastrando materiales al mar, donde se acumulan formando la materia prima de nuevas rocas sedimentarias. Dedujo que, bajo el efecto del tremendo calor de la Tierra, las rocas sedimentarias antiguas podían elevarse y plegarse, formando nuevas montañas y continentes. Y formuló la hipótesis de que, a grandes profundidades bajo la corteza terrestre, las propias rocas podían fundirse y salir a la superficie a través de los volcanes, proporcionando otro suministro de roca erosionable. Su aportación a la ciencia fue asombrosa.

La revolución de las placas tectónicas aportó una nueva dimensión dinámica al modelo geológico de Hutton. La teoría que afirma que la superficie de la Tierra está dividida en «placas» que se mueven muy despacio en diferentes direcciones se aceptó de manera definitiva a finales de los años cincuenta. Pero ya en 1620, el escritor y filósofo inglés Francis Bacon había comentado la curiosa coincidencia entre la costa oriental de América del Sur y la costa occidental de África. Sin embargo, fue el alemán Alfred Wegener (1880-1930) quien defendió por primera vez, entre 1912 y 1915, la hipótesis científica de la «deriva de los continentes». Sus teorías fueron acogidas con burlas y sólo se aceptaron cuando quedaron confirmadas por evidencias modernas, basadas en el hecho irrebatible del paleomagnetismo.



Los plegamientos de las rocas demuestran el carácter inquieto de la corteza terrestre.

Pero aunque estas teorías explican mucho, no alcanzan a explicar todos los grandes misterios de la Tierra.

Continentes en movimiento

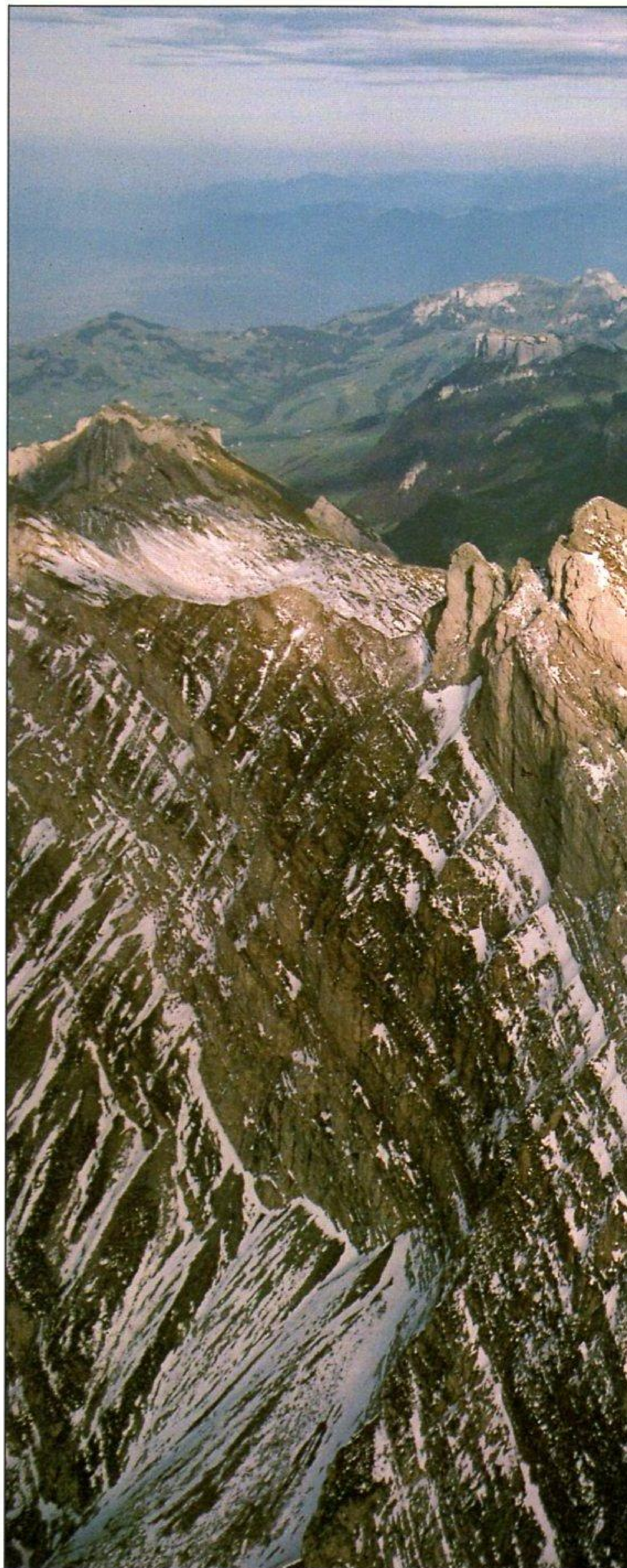
La Tierra en que vivimos se altera continua e inexorablemente. Las zonas de actividad sísmica y volcánica que rodean el océano Pacífico son manifestaciones secundarias —a pesar de sus efectos destructivos— de esta verdad fundamental. No resulta fácil detectar estos cambios, pero encontramos pruebas evidentes de los mismos en las montañas y los océanos, y en las entrañas de la Tierra misma. Gracias a esta evidencia hemos deducido el proceso misterioso e irresistible por el que los continentes se forman, se desplazan, se descomponen y vuelven a juntarse.

Ya en el siglo XVII se sugirió la posibilidad de que algunos de los continentes actuales hubieran estado unidos en otras épocas. Pero aunque los científicos reconocían que el contorno de África encajaba casi a la perfección con el de América del Sur, no eran capaces de imaginar cómo podían haberse separado las dos masas de tierra. En 1801, el geógrafo alemán Alexander von Humboldt sugirió que el océano Atlántico podía haberse formado a partir de una gran corriente que se abrió paso entre ellas, separándolas.

A principios de este siglo, el alemán Alfred Wegener (1880-1930) propuso la hipótesis de la «deriva continental», conocida en la actualidad como tectónica de placas. Wegener era astrónomo y meteorólogo y, a pesar de las abundantes pruebas que aportó en apoyo de sus teorías, muchos geólogos se burlaron de ellas cuando se publicaron en los años veinte.

En años posteriores apenas se prestó atención a la teoría de las placas tectónicas, hasta que en los años sesenta se despertó un nuevo interés por las ciencias geológicas. Se descubrió la existencia del paleomagnetismo —magnetismo residual en las rocas antiguas— y se identificó por fin una fuente de energía capaz de desplazar continentes enteros sobre la faz de la Tierra.

Esta energía se encuentra bajo nuestros pies. En las profundidades de la Tierra, la descomposición o «desintegración» de metales radiactivos, como el uranio, el torio y



Los estratos rocosos, casi verticales, de los Alpes suizos constituyen un impresionante recordatorio del lento pero implacable poder de los movimientos de la corteza. Hace unos 120 millones de años, la gigantesca placa africana, que se desplazaba hacia el norte, chocó con la placa de Eurasia. Como resultado, la tierra se arrugó, y los sedimentos que formaban capas planas comenzaron a plegarse y montarse sobre sí mismos. Hace 25 millones de años, estas fuerzas generadas en las profundidades de la Tierra levantaron las rocas, formando escarpados picos, cuya belleza da una engañosa sensación de inmovilidad.



La dinámica de la Tierra

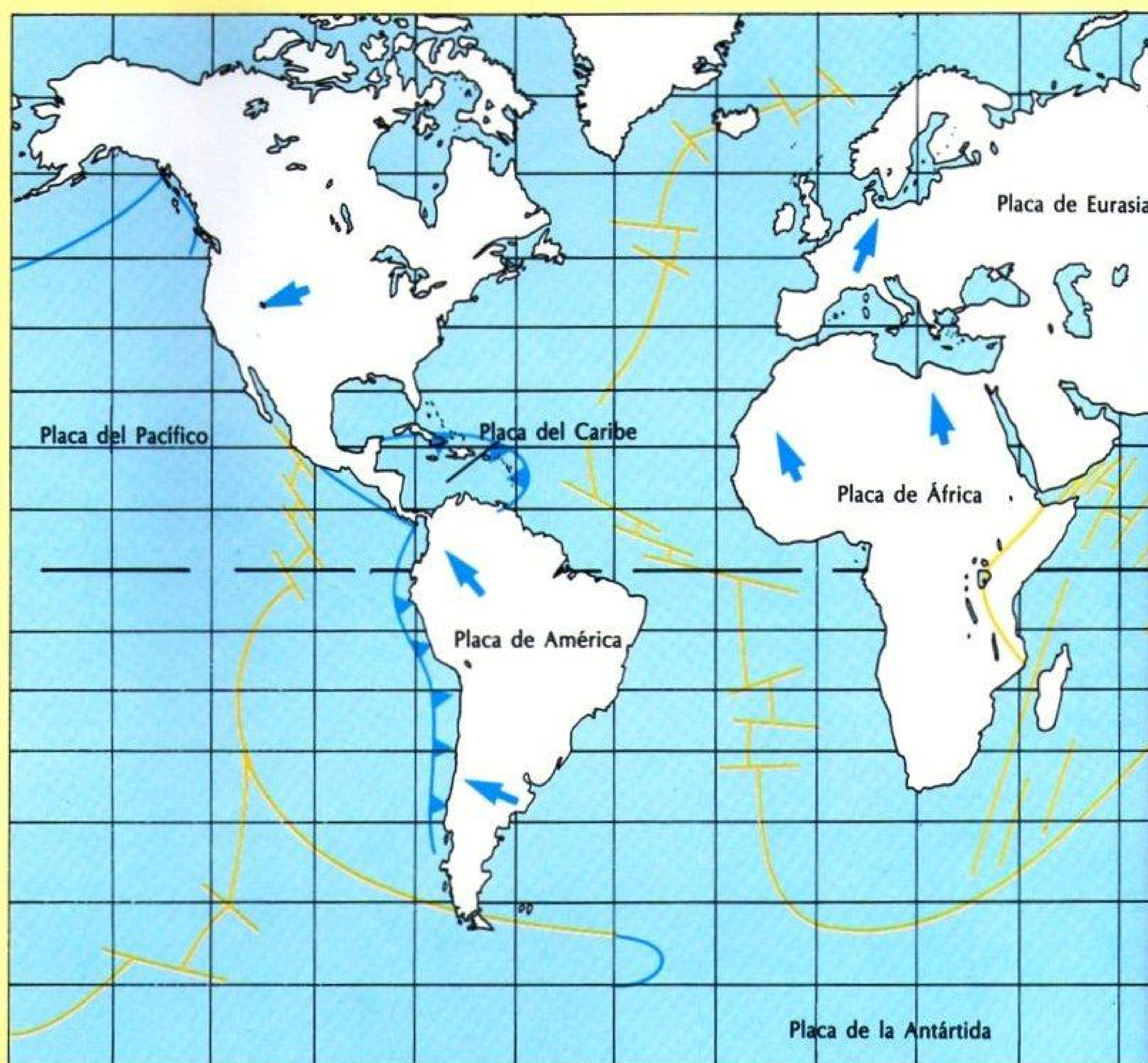
La teoría básica de la tectónica de placas sostiene que la corteza terrestre está formada por seis placas rígidas principales y varias placas secundarias, que flotan sobre una capa blanda y flexible del manto, y que se mueven a consecuencia de las corrientes de convección de las profundidades del manto. Cada una de las placas se mueve independientemente de las demás, aunque para ello necesita que también se muevan las placas adyacentes. Los contactos entre placas determinan zonas de intensa actividad sísmica: movimientos orogénicos, terremotos y volcanes.

Las placas se forman constantemente a lo largo de las dorsales oceánicas, y se destruyen de manera igualmente constante en las fosas que suelen correr paralelas a los bordes de los océanos. En consecuencia, aunque los océanos han existido durante miles de millones de años, no se han encontrado nunca sedimentos marinos de antigüedad superior a los ciento sesenta millones de años, aunque en tierra firme sí se han hallado rocas de casi cuatro mil millones de años de edad. Las muestras de roca extraídas del fondo del mar se pueden datar por los fósiles que contienen.

Puesto que la corteza terrestre no es estática, dentro de cincuenta millones de años la forma de los continentes habrá cambiado. Según los datos de que disponemos, las Américas continuarán desplazándose hacia el oeste y el Atlántico se agrandará a expensas del Pacífico. Una larga franja de la costa oeste de Norteamérica se convertirá en una isla y se desplazará más al norte; y también América del Sur se correrá hacia el norte, comprimiendo América Central y Panamá.

Australia y Nueva Guinea se moverán también hacia el norte, hasta chocar con el Sureste asiático. África se juntará con Europa, con la consiguiente desaparición del Mediterráneo y la formación de una nueva cadena de montañas entre el noroeste de África y Turquía. La Gran Fosa Tectónica puede seguir agrandándose, hasta desprender un fragmento de África occidental, que se acercará más a Asia.

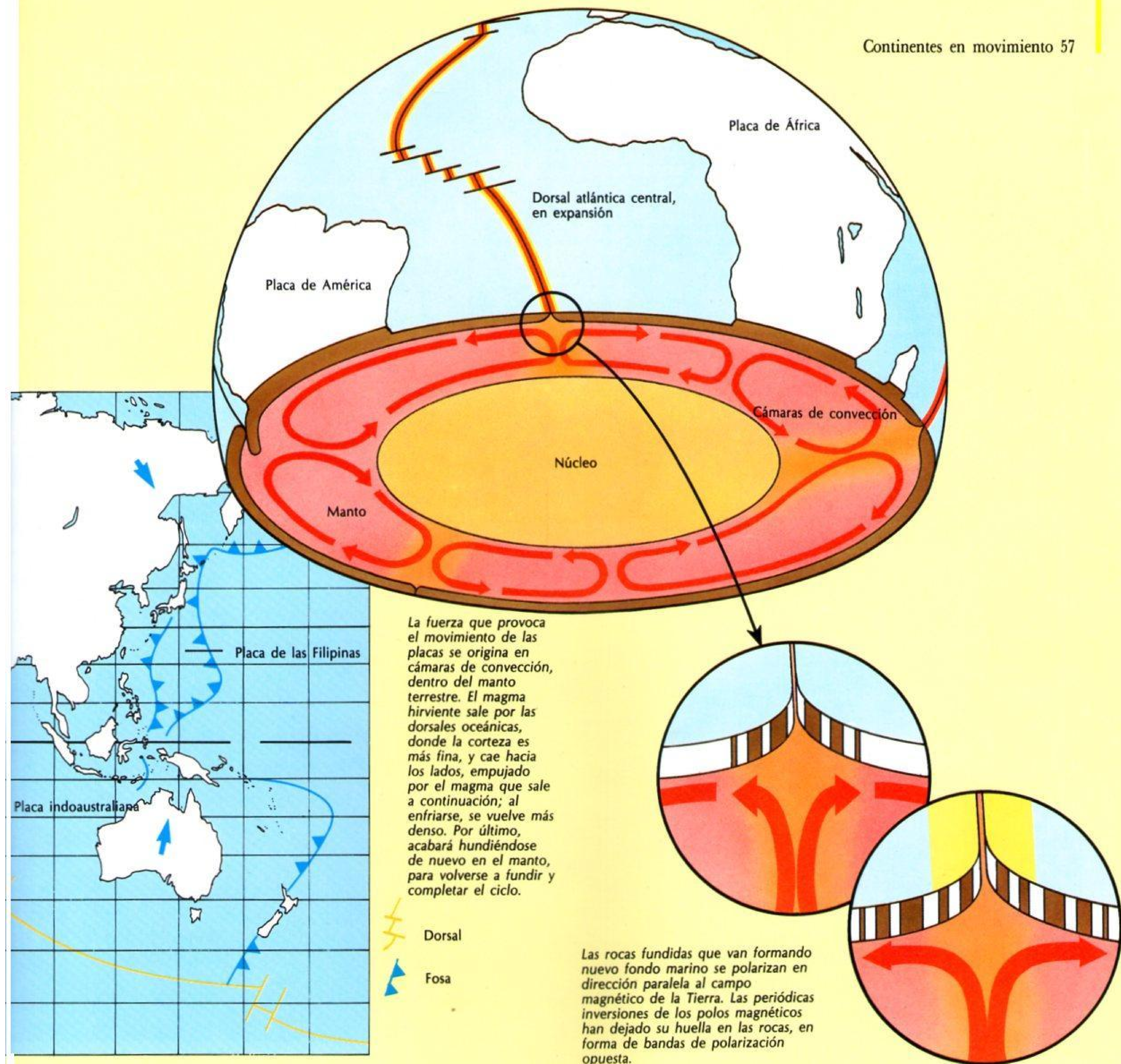
La corteza terrestre está dividida en varias placas tectónicas, la mayoría de las cuales comprenden una parte continental y otra de fondo marino. Las placas se encuentran en constante movimiento, formándose a lo largo de las dorsales oceánicas y consumiéndose en las fosas, mientras se desplazan muy lentamente de sus posiciones actuales.



el potasio, produce tanto calor que las rocas se funden, como lo demuestran las erupciones volcánicas. El calor que se produce de manera constante sólo se puede perder a través de la superficie terrestre. El material al rojo asciende desde las capas profundas hasta cerca de la superficie, y vuelve a bajar a las profundidades después de enfriarse. Este continuo «batido» ha dado lugar a una estructura estratificada, que proporciona otra clave para desentrañar el misterio del movimiento de los continentes.

En la actualidad, las sustancias más pesadas forman un denso «núcleo» de 7.000 km de diámetro, que representa un tercio de la masa de la Tierra, pero sólo una sexta parte de su volumen. Rodeando el núcleo se encuentra el «manto», más ligero y de unos 2.900 km de espesor. La capa más externa es una fina «corteza», comparable a la piel de un melocotón, formada por los materiales más ligeros, que flota sobre el manto. En el fondo de los océanos, la corteza tiene sólo 5 km de espesor, pero en los continentes su profundidad varía de 35 a más de 50 km, ya que las «raíces» de las cadenas montañosas se proyectan hacia abajo penetrando en el manto.

Al ser tan espesos los continentes, la mayor parte del calor producido en el interior de la Tierra se desprende a través de las partes más finas de la corteza, la que forma los fondos de los océanos. El material fundido sube hasta debajo de la corteza, y en las profundidades del océano se alzan cadenas volcánicas o «crestas en expansión». Entonces



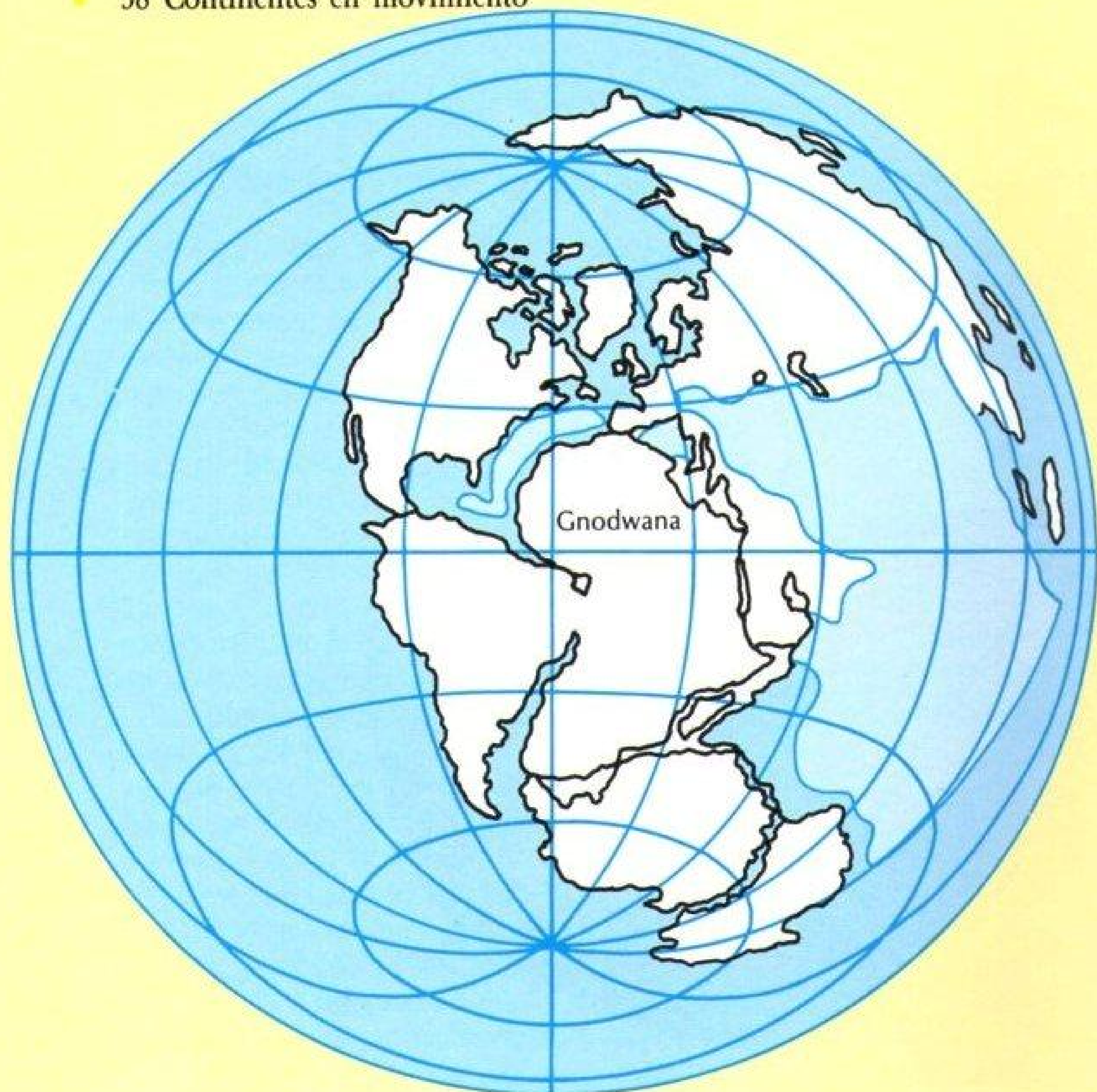
La fuerza que provoca el movimiento de las placas se origina en cámaras de convección, dentro del manto terrestre. El magma hirviente sale por las dorsales oceánicas, donde la corteza es más fina, y cae hacia los lados, empujado por el magma que sale a continuación; al enfriarse, se vuelve más denso. Por último, acabará hundiéndose de nuevo en el manto, para volverse a fundir y completar el ciclo.

Las rocas fundidas que van formando nuevo fondo marino se polarizan en dirección paralela al campo magnético de la Tierra. Las periódicas inversiones de los polos magnéticos han dejado su huella en las rocas, en forma de bandas de polarización opuesta.

el material caliente comienza a moverse en dirección horizontal, alejándose de la cresta por ambos lados. Al hacerlo, tira del fondo del mar arrastrándolo consigo. De esta forma, a lo largo de la cresta en expansión se forma una grieta, que se ensancharía cada vez más si no se fuera llenando al mismo tiempo con más roca fundida. Ahora disponemos de fotografías submarinas en las que se ven estas rocas incandescentes y burbujeantes, antes de enfriarse por el contacto con el agua de las profundidades marinas.

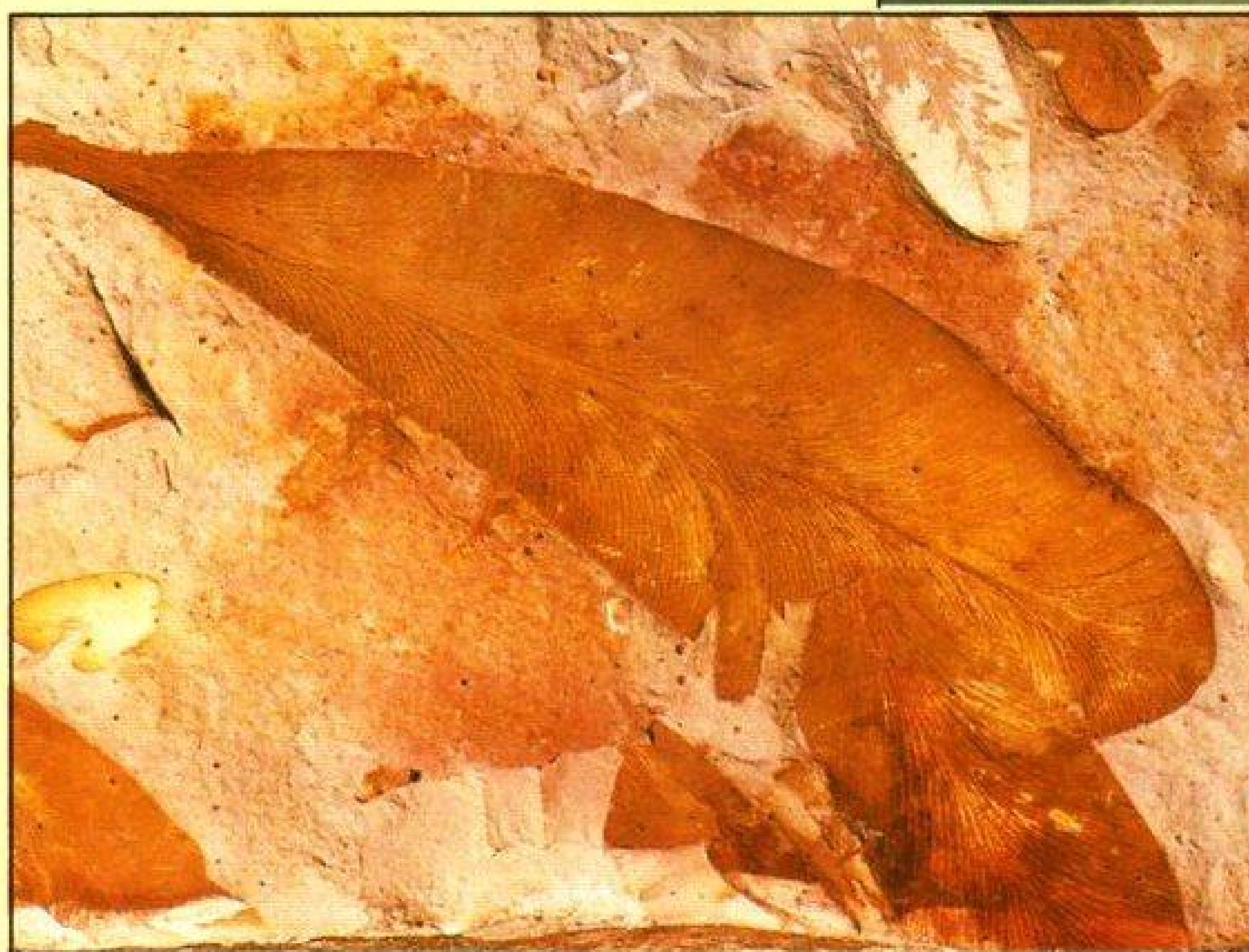
Cuando las rocas procedentes del manto se han separado de la cresta en expansión y vuelven a enfriarse, regresan a las capas profundas del manto, arrastrando con ellas la corteza que forma el fondo del mar. Este fenómeno tiene lugar en las grandes fosas oceánicas, como la Fosa de las Marianas.

Si tomamos un mapa y vamos suprimiendo el fondo del mar, empezando por el que se ha formado en tiempos más recientes, devolviendo los continentes a la posición que ocupaban antes de que estas rocas los obligaran a separarse, comprobaremos que los continentes acaban por unirse, formando un supercontinente al que llamamos Pangea, y que existió hace unos doscientos millones de años. La parte norte de aquel supercontinente, denominada Laurasia, estaba formada por las actuales Norteamérica y Eurasia. La parte sur, Gondwana, la componían Australia, América del Sur, África, la Antártida y la India, que más tarde se desprendió, desplazándose hacia el norte para unirse a Asia.



Hace 160 millones de años, los continentes del sur, que todavía se encontraban unidos formando el supercontinente de Gondwana, comenzaron a separarse de los del norte, creándose nuevos océanos entre ellos.





Las plantas fósiles ofrecen pruebas convincentes de la existencia de Gondwana. El helecho arborescente Glossopteris *ha dejado huellas indelebles en las rocas de todos los continentes del hemisferio sur. Esta hoja fósil, encontrada en Nuevo Gales del Sur, Australia, corresponde al período pérmico, hace aproximadamente 260 millones de años.*

¿Por qué se fragmentó este supercontinente? Probablemente, porque era tan grande que algunas de sus partes estaban situadas encima de las regiones donde afloraba el material caliente del manto, extendiéndose hacia los lados. Poco a poco, esta fuerza fue disgregando el supercontinente.

Durante estos movimientos, mientras América del Sur se desplazaba hacia el oeste, el fondo oceánico antiguo, situado al oeste del continente, se iba hundiendo en una fosa del océano Pacífico. Pero con el tiempo, el continente suramericano, demasiado grande y ligero para ser tragado por la fosa, llegó al borde de la misma. A partir de entonces, el continente sólo se podía seguir desplazando a condición de que la fosa consumiera el fondo marino antiguo de la placa del Pacífico, situado al oeste. Al irse deslizando este material por debajo de América del Sur, su hundimiento provocó inestabilidades y movimientos orográficos en todo el borde occidental del continente. Y así se formaron los Andes.

Otras cadenas montañosas se han alzado por diferentes razones, cuando los fragmentos de los antiguos supercontinentes entraron en colisión unos con otros. La India sigue empujando hacia el norte, haciendo elevarse la cordillera del Himalaya. Y África se desplaza hacia el norte, arrugando las partes meridionales de Europa hasta formar montañas como los Alpes. Los Pirineos se



La falla de San Andrés, en California, es un ejemplo típico de falla de transformación, formada cuando dos placas se deslizan una junto a otra. No se producen levantamientos ni hundimientos, pero los temblores de tierra son frecuentes.

formaron cuando la península Ibérica giró a derecha, incrustándose en Francia.

Este proceso no es reciente. Asia fue en otros tiempos un continente separado, y su colisión con Europa, hace unos doscientos cincuenta millones de años, levantó una cadena de elevadas montañas, cuyos restos erosionados son los actuales Urales. Estos acontecimientos debieron cambiar el clima de las diferentes regiones tanto como su geografía, y al abrigo de las montañas se formaron nuevos desiertos, a los que no llegaban las nubes portadoras de lluvia.

El «magnetismo fósil» de las rocas nos permite rastrear la historia de los continentes hasta remontarnos a una época anterior a la formación del fondo marino más antiguo. Ahora está claro que la India no es el único fragmento de Gondwana que se desprendió y derivó hacia el norte hasta chocar con Asia. El Tibet, el Sureste asiático y China estuvieron también separados de Siberia, y chocaron con ella en diferentes períodos, entre trescientos cincuenta y doscientos cincuenta millones de años atrás.

Aun sabiendo todo esto, tendemos a suponer que nuestro mundo es estable e inalterable, hasta que un terremoto o una erupción volcánica en el borde de una de las placas tectónicas nos obliga a admitir los arbitrarios resultados de su implacable movimiento. De pronto, recordamos el misterioso poder de la Tierra inquieta.

La fragua del dios del fuego

Los portentosos procesos que dan forma a la superficie de nuestro planeta tienen lugar tan despacio que los humanos no nos damos cuenta de ellos. Su escala temporal es tan grande que si se pudiera registrar en una película la historia geológica de la Tierra, toda una vida humana no abarcaría más que un solo fotograma. Pero en algunas ocasiones, se producen cambios geológicos repentinos y terroríficos, en los que se desatan fuerzas inimaginables con resultados cataclísmicos.

Muchos kilómetros por debajo de la superficie de la tierra, existe una enorme reserva de energía calorífica, acumulada en la roca fundida o magma. Cuando este magma encuentra una fisura o punto débil en la corteza terrestre, se abre paso hasta la superficie, y el resultado es una erupción volcánica.

Los volcanes tienen su origen en gigantescas cámaras de magma, que se mantienen donde están a causa de la tremenda presión de la roca que las rodea. Pero el magma es más ligero que la roca, y se abre paso a través de la grieta más pequeña. Al ascender, los gases disueltos en él se expanden con tanta fuerza que acaban por abrir un agujero en la corteza terrestre. El gas sale proyectado hacia la atmósfera, arrastrando polvo y cenizas, mientras el magma se desborda sobre el terreno en forma de lava.

Esta bocanada del fuego primordial de la Tierra es un fenómeno que siempre ha aterrado e intrigado a los seres humanos, pero no siempre se trata de sucesos aislados y catastróficos. Algunos tipos de magma fluyen sin violencia en forma de lava, que se desliza por cualquier pendiente, enfriándose y solidificándose con rapidez. Dado que la energía del magma se libera poco a poco, los volcanes con este tipo de lava suelen permanecer activos durante siglos, sin erupciones catastróficas.

Otros tipos de magma tienen una consistencia viscosa, casi como la de un caramelo blando. Al enfriarse, la lava se acumula en columnas plegadas y bloques dentados, for-



Un incesante chorro de lava brota de los volcanes de Hawai, ofreciendo un espectáculo magnífico y fascinante, pero también aterrador. Los nativos han aprendido a vivir junto a estos ríos de fuego, pero la familiaridad no ha hecho que les perdieran el respeto, ya que nadie sabe cómo se forma el magma en las profundidades de la Tierra y cuándo podrá surgir en forma de lava, destruyendo su mundo en cuestión de segundos.



mando volcanes con conos altos y empinados. Mientras se mantenga el flujo de magma, las fuerzas procedentes de debajo de la corteza se liberan sin violencia. Pero si el flujo queda bloqueado por solidificación de la lava sobre la cámara de magma, la situación es muy diferente.

Cuando se produce un taponamiento de este tipo, las fuerzas que empujan el magma hacia arriba siguen actuando, acumulándose enormes presiones a lo largo de décadas e incluso de siglos. En la superficie pueden apreciarse cambios en el nivel del suelo o escapes de gas, que revelan la acumulación de presión bajo tierra, pero por lo general no se aprecia ningún indicio de que algo está a punto de ocurrir. La misma inactividad resulta de por sí ominosa.

Uno de estos períodos de silencio amenazador fue el único anuncio de una de las mayores erupciones de la historia moderna. En 1883, la isla indonesia de Krakatoa llevaba dos siglos sin dar muestras de actividad volcánica, y sus laderas estaban cubiertas de frondosos bosques que llegaban hasta las cálidas aguas del estrecho que separa Java de Sumatra. Pero bajo aquella concurrida ruta marítima se incubaba una gigantesca bomba volcánica, cuyos efectos se iban a sentir en el mundo entero.

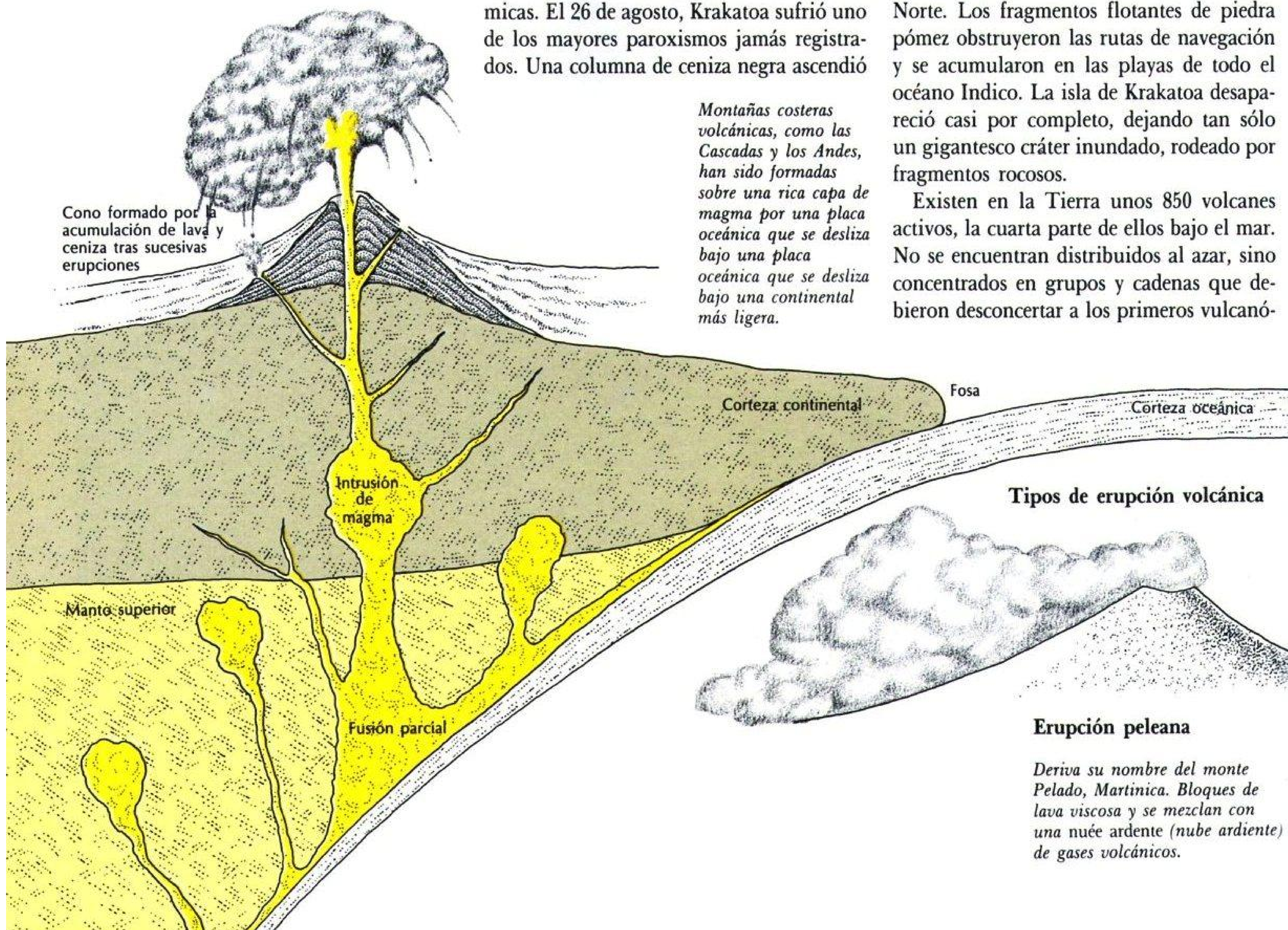
En mayo de 1883, Krakatoa estalló. Se produjo una colosal explosión que se oyó a más de 160 km de distancia, y una enorme columna de ceniza y polvo se alzó hasta el cielo, empujada por un chorro de aire a temperatura de alto horno. Tras esta erupción inicial, los estallidos de actividad se sucedieron intermitentemente durante dos meses. Pero todo esto no era más que el preludio del espectáculo final.

Los vulcanólogos emplean la palabra «paroxismo» para describir un estallido de actividad volcánica de proporciones cataclísmicas. El 26 de agosto, Krakatoa sufrió uno de los mayores paroxismos jamás registrados. Una columna de ceniza negra ascendió hasta la atmósfera superior, sumiendo el estrecho en tinieblas. El volcán se desmoronó, provocando un tsunami u ola gigante, que provocó las primeras víctimas en Java. Durante toda la noche continuaron las erupciones, que se pudieron oír a más de 1.000 km de distancia.

El acto final de la destrucción de la isla tuvo lugar al día siguiente, con una serie de cuatro explosiones, la tercera de las cuales fue, probablemente, la mayor que registra la historia: casi 20 km³ de cenizas lanzados al aire y 36.000 muertos. Algunos perecieron asfixiados por el polvo o envenenados por los gases tóxicos; el resto se ahogó en los gigantescos tsunamis.

Los efectos secundarios de estas colosales explosiones se sintieron en todo el mundo. Las ondas atmosféricas de choque que emanaron de Krakatoa dieron varias veces la vuelta al globo, y el polvo volcánico esparcido por la estratosfera provocó puestas de sol anormalmente brillantes en América del Norte. Los fragmentos flotantes de piedra pómez obstruyeron las rutas de navegación y se acumularon en las playas de todo el océano Indico. La isla de Krakatoa desapareció casi por completo, dejando tan sólo un gigantesco cráter inundado, rodeado por fragmentos rocosos.

Existen en la Tierra unos 850 volcanes activos, la cuarta parte de ellos bajo el mar. No se encuentran distribuidos al azar, sino concentrados en grupos y cadenas que debieron desconcertar a los primeros vulcanó-



Montañas costeras volcánicas, como las Cascadas y los Andes, han sido formadas sobre una rica capa de magma por una placa oceánica que se desliza bajo una placa oceánica que se desliza bajo una continental más ligera.

Tipos de erupción volcánica

Erupción peleana

Deriva su nombre del monte Pelado, Martinica. Bloques de lava viscosa y se mezclan con una nuée ardente *(nube ardiente) de gases volcánicos.*

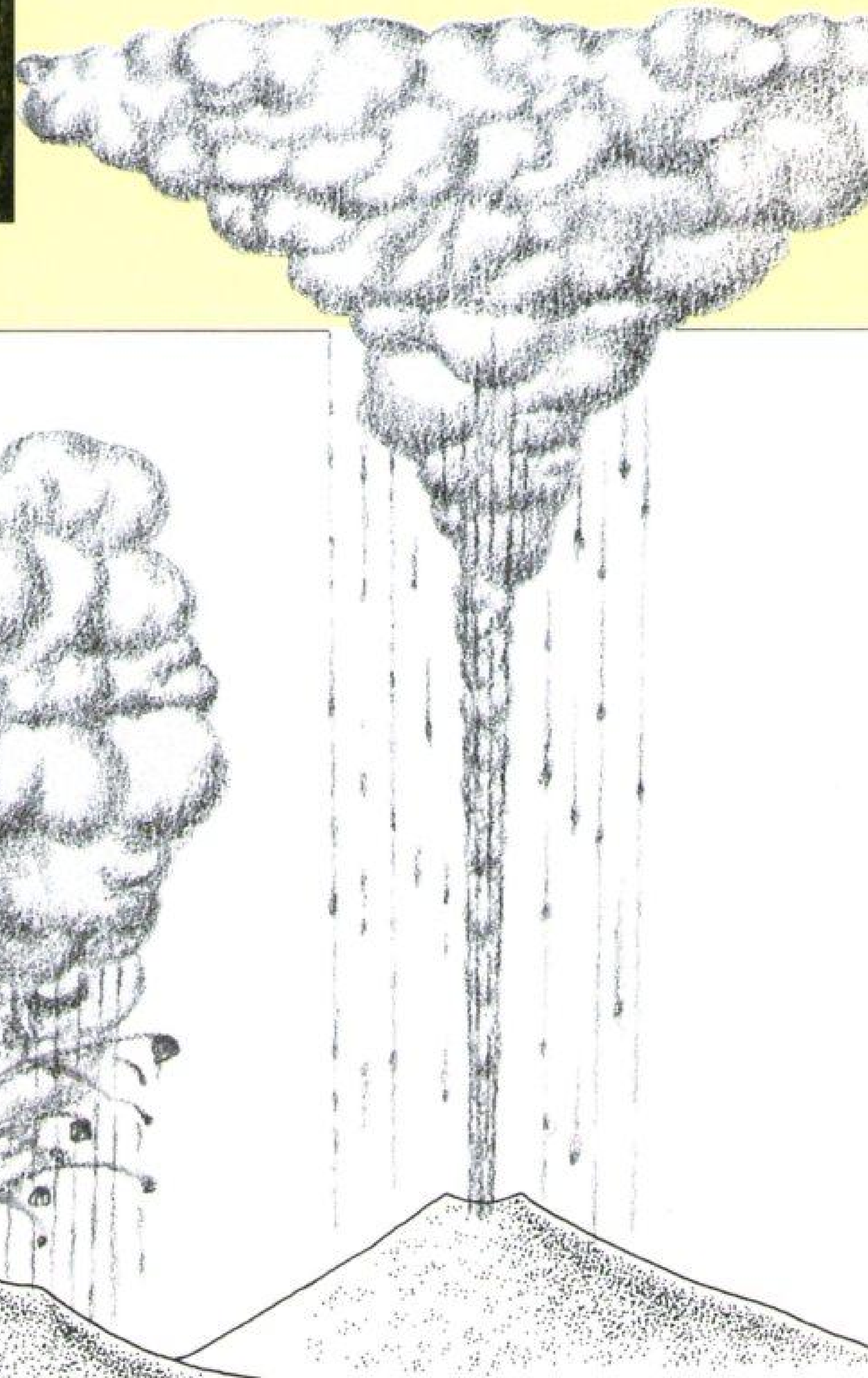


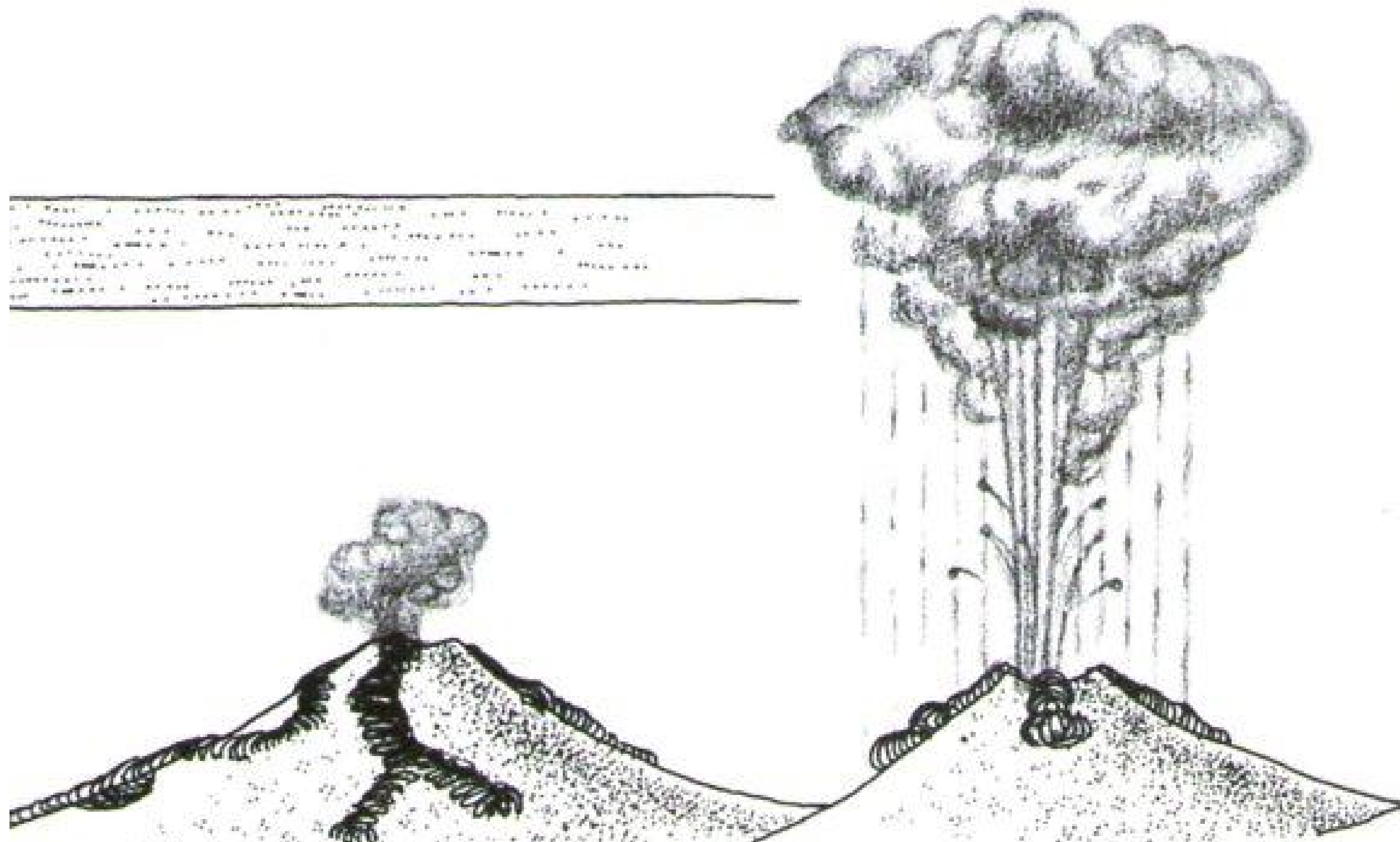
La torre de la iglesia se alza como monumento a la aldea sepultada de San Juan Parangaricutiro.

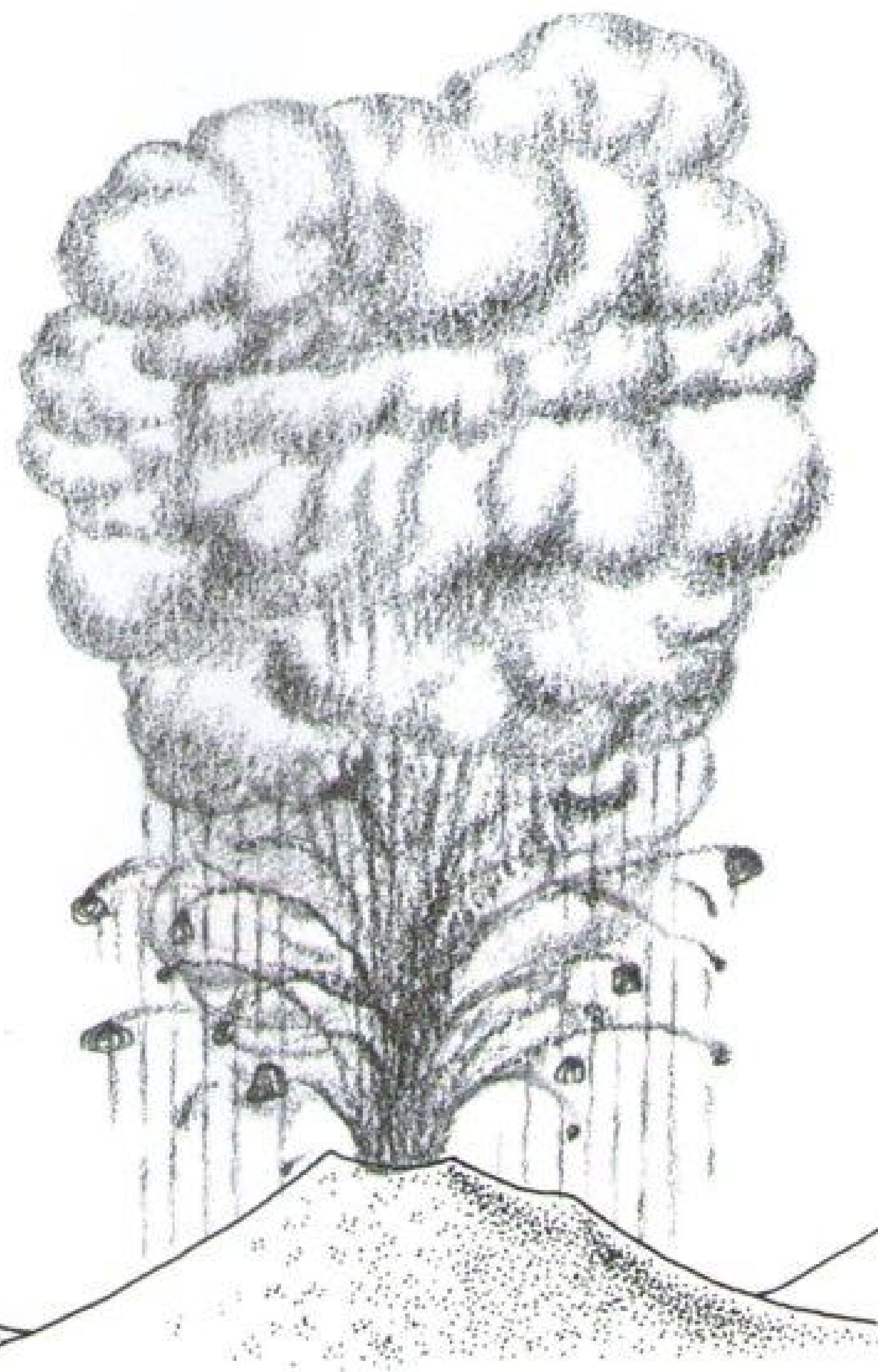
Jugando con el peligro

Los agricultores no tardaron en descubrir que la tierra volcánica era muy fértil, y pronto proliferaron las poblaciones en las faldas de los volcanes, una temeridad que con frecuencia ha costado muy cara. En el año 79, Pompeya y Herculano quedaron sepultadas por las cenizas del Vesubio; y en 1902, un diluvio de cenizas y gas tóxico destruyó la ciudad de St. Pierre en la Martinica.

Un caso atípico fue el de la aldea mexicana de San Juan Parangaricutiro, enterrada poco a poco. En febrero de 1943 se abrió una enorme grieta, de la que surgió lava hirviente y roca fundida. El volcán Paricutín tardó una semana en alcanzar 168 m de altura; un año más tarde, ya llegaba a los 336 m, y la lava cubría el terreno en 32 km a la redonda.







Erupción hawaiana

De violencia moderada, pero muy duradera, con un flujo continuo de lava, que a menudo sale por fisuras secundarias en las laderas del volcán.

Erupción estromboliana

Típica del volcán italiano Stromboli, que arroja de manera espasmódica pequeñas bombas de lava viscosa, gas y cenizas, que caen a corta distancia.

Erupción vulcaniana

Alude al Vulcano, volcán caracterizado por explosiones aisladas de magma muy viscoso, que arrojan bloques ardientes a gran distancia.

Erupción pliniana

Plinio el Viejo fue testigo de la erupción del Vesubio en el año 79 d. C., que arrojó cenizas a tremenda presión hasta una gran altura.

Vida después de la muerte

La tremenda erupción que tuvo lugar en 1980 en el monte Santa Helena (que forma parte de los montes Cascade, de Washington, EE.UU.) es el caso de explosión volcánica mejor documentado de la historia.

En marzo, una serie de movimientos sísmicos en las proximidades del monte había convencido a los científicos de la inminencia de una erupción; para el 10 de mayo se había formado un ominoso bulto de 90 m en la cara norte, que crecía a razón de metro y medio al día. En opinión del geólogo David Johnston, que perdió la vida en la erupción, el monte era como una bomba con la mecha encendida, pero nadie sabía si la mecha era larga o corta.

Cuando por fin se produjo la explosión, a las 8.32 de la mañana del 18 de mayo, 4 km^3 de montaña salieron disparados por los aires, reduciendo en 400 m su altitud anterior, de 2.549 m. Millones de árboles cayeron derribados, con las copas apuntando hacia fuera,

La erupción del monte Santa Helena: tras una primera erupción horizontal, se produjo una explosión vertical que arrojó una columna de gas, cenizas y roca hasta 19 km de altura.



logos que trataban de encontrar explicación a estos vertidos del interior de la Tierra. La mayor de estas cadenas es el «Cinturón de Fuego» que circunda el Pacífico, formando un arco en forma de herradura que se extiende desde Nueva Zelanda hasta el mar de Bering, y desde allí casi hasta la punta de América del Sur.

A principios de este siglo, la teoría de la tectónica de placas consiguió explicar por fin el misterio de las cadenas volcánicas. El Cinturón de Fuego, por ejemplo, se ha formado a lo largo de la línea de contacto de la placa del Pacífico con otras cinco placas que soportan masas continentales. Krakatoa se encuentra en la zona de actividad volcánica más intensa del mundo, donde la placa Indoaustraliana se desliza bajo la placa de Eurasia, frente a las costas de Indonesia. El monte Santa Elena, que hizo explosión en 1980 después de más de un siglo de silencio, se encuentra cerca del punto de contacto de la placa de Juan de Fuca —situada bajo el Pacífico norte— con la placa que forma Norteamérica. Y los volcanes del Mediterráneo, como el Etna, el Stromboli y el Vesuvio, están muy cerca de la línea de contacto entre las placas de África y Eurasia.

Existen algunos volcanes que parecen incumplir esta norma, y que no surgen cerca de las líneas de contacto entre placas, sino lejos de ellas. Los volcanes de Hawai, por ejemplo, se encuentran casi en el centro de la placa del Pacífico. Estos volcanes se forman por la acción de «puntos calientes» o penachos de magma, que surgen de un punto fijo del manto terrestre. Aún no se ha explicado bien la existencia de estos puntos calientes, pero se sabe que al desplazarse la

dejando impracticable una extensión de más de 575 km^2. No quedó nada de vegetación para alimentar a los animales, y los ríos se llenaron de ceniza y escombros, que causaron la muerte de todos los organismos que vivían en ellos.

Durante semanas, una enorme extensión de terreno quedó tan muerta como la luna. Sin embargo, a pesar de la terrible devastación, la naturaleza empezó a recuperar poco a poco las laderas arrasadas. La ceniza volcánica, por extraño que parezca, es una sustancia muy fértil, repleta de minerales necesarios para el crecimiento de las plantas. A los pocos meses de la explosión, las semillas arrastradas por el viento habían germinado y florecido; los brotes echaron raíces y el bosque fue resucitando. A finales de los años ochenta se permitió la entrada en la zona de grupos de montañeros, que contemplaron el tremendo poder de la naturaleza, tanto para destruir como para generar vida.

En julio tuvo lugar otra tremenda erupción pliniana. La nube en forma de hongo se formó al perder fuerza la columna inicial, que comenzó a expandirse hacia afuera.



Miles de hectáreas de bosque quedaron arrasadas por las cenizas y los desbordamientos de ríos y lagos. Las minúsculas figuras dan una idea de las dimensiones del desastre.





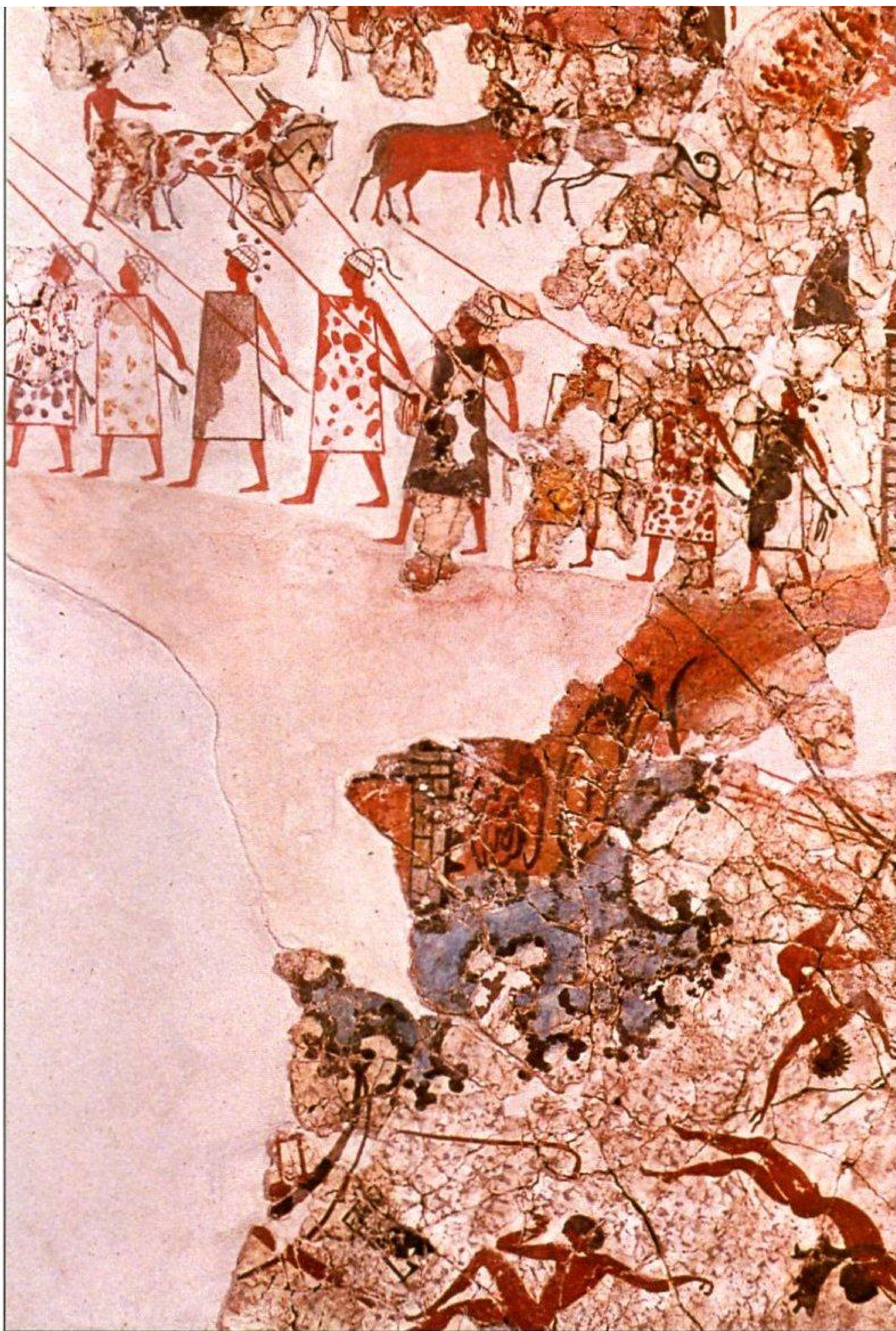
placa sobre ellos, el magma ascendente va formando cadenas de islas volcánicas.

En las islas Hawai, este proceso ha dado lugar a una cadena de volcanes de más de 600 km de longitud. Los correspondientes a las islas situadas más al oeste se encuentran inactivos desde hace mucho tiempo, pero los más orientales, que están directamente encima del punto caliente, sufren constantes erupciones. El Mauna Kea es el volcán activo más grande del mundo.

Los volcanes se suelen clasificar en activos, latentes y extinguidos, pero estas categorías son equívocas. El registro histórico es una vara de medir demasiado corta para determinar la actividad de un volcán, que puede permanecer activo durante cientos de miles de años, con siglos de aparente inactividad entre las sucesivas erupciones. Su última erupción pudo producirse antes de que existiera constancia histórica, pero su aparente latencia o extinción puede encubrir los preparativos de una explosión.

En la actualidad, se puede determinar la posibilidad de una erupción inminente mediante una serie de mediciones muy precisas. Aunque no es posible predecir el momento exacto de la erupción, sí se puede calcular su probabilidad.

Antes de que la vulcanología se convirtiera en una disciplina científica, la predicción de erupciones era mucho más azarosa, y se basaba en la interpretación de las señales que acompañan a la acumulación gradual de presión bajo la superficie de la tierra. La aparición de surtidores de agua hirviente o de gas sulfuroso servía como señal de advertencia, lo mismo que los temblores de tierra o los cambios en el nivel del suelo.



Pero muchas veces estas señales no servían de gran ayuda, porque llegaban demasiado tarde para ponerse a salvo.

En algunas erupciones se forma una avalancha de ceniza y gases tóxicos, denominada *nuée ardente,* que puede avanzar a más de 250 km por hora, cubriendo todo lo que encuentra a su paso. Una de estas terroríficas avalanchas destruyó en 1902 la ciudad de San Pedro, en la Martinica, matando a sus 30.000 habitantes; sólo dos personas salvaron la vida. Casi igual de rápida es una avalancha de fango volcánico que se conoce por su nombre indonesio, *lahar*. El *lahar* se produce cuando la roca fundida se mezcla con agua, nieve o hielo, formando un río de fango que arrastra con su peso árboles y casas; y cuando por fin se detiene, el fango se endurece, atrapando a sus víctimas como en un bloque de hormigón.

Nuestros conocimientos sobre los efectos de las erupciones disminuyen de manera inevitable cuanto más nos remontamos hacia atrás en el tiempo, ya que, al carecer de registros escritos, resulta difícil estimar la magnitud de las erupciones del pasado. Los datos sobre antiguas erupciones se basan en parte en la geología, y en parte en mitos y leyendas que se trasmitieron por tradición oral.

Las investigaciones geológicas indican sin lugar a dudas que la erupción explosiva del monte Mazama, ocurrida hace 6.000 años en Norteamérica, tuvo que ser una de las más grandes de la prehistoria reciente. El lago del cráter, que mide 10 km de diámetro, da testimonio de la cantidad de roca y ceniza que debió salir proyectada hacia el cielo, esparciéndose sobre todo el continente. En Nebraska se han encontrado restos de rinocerontes sepultados en ceniza, que parecen indicar una erupción aun mayor, que debió tener lugar hace unos 10.000 años, aunque se ignora el punto exacto.

Otra explosión más reciente pero igualmente misteriosa destruyó la isla griega de Tera, o Santorín, hacia el 1450 a. C. Lo único que queda de Santorín es un gigantesco cráter submarino en el mar de Creta, de uno 80 km^2 de superficie. Se ha calculado que la fuerza explosiva que creó semejante cráter debió lanzar por los aires unos 30 km^3 de ceniza, ocultando el sol en todo el Mediterráneo oriental durante varios días.

Resulta algo irritante que no se hayan conservado informes directos de un suceso tan extraordinario. No obstante, las pruebas circunstanciales encontradas en la vecina isla de Creta parecen indicar que la erupción no sólo destruyó ciudades y aldeas, sino toda la avanzada civilización minoica, que dominaba por entonces la mayor parte del Egeo.

Los arqueólogos e historiadores han debatido durante mucho tiempo sobre las razones del súbito hundimiento de la cultura minoica. Hasta hace poco, se creía que la explosión de Santorín se produjo en fecha muy tardía como para que influyera en el desastre. Pero las dataciones más recientes, realizadas en objetos tan distantes como el hielo glacial de Groenlandia y unas piñas encontradas en California, parecen indicar que la erupción de Santorín pudo muy bien acarrear la destrucción de la misteriosa cultura minoica.

También es posible que la leyenda del hundimiento de la Atlántida sea una crónica fabulada de la destrucción de Santorín. Y la «columna de humo» mencionada en el libro bíblico del Éxodo presenta una sospechosa semejanza con una erupción volcánica vista desde muy lejos.



¿Es posible que Tera fuera la legendaria y desaparecida Atlántida?
Las pinturas murales que han sobrevivido a 3.500 años de enterramiento bajo 30 m de ceniza volcánica revelan una sociedad avanzada, con un ejército organizado, una próspera vida comercial, casas de muchos pisos y barcos de elegante diseño. Señales todas ellas de que la leyenda podría ser verdad.

Peligro en el Mediterráneo

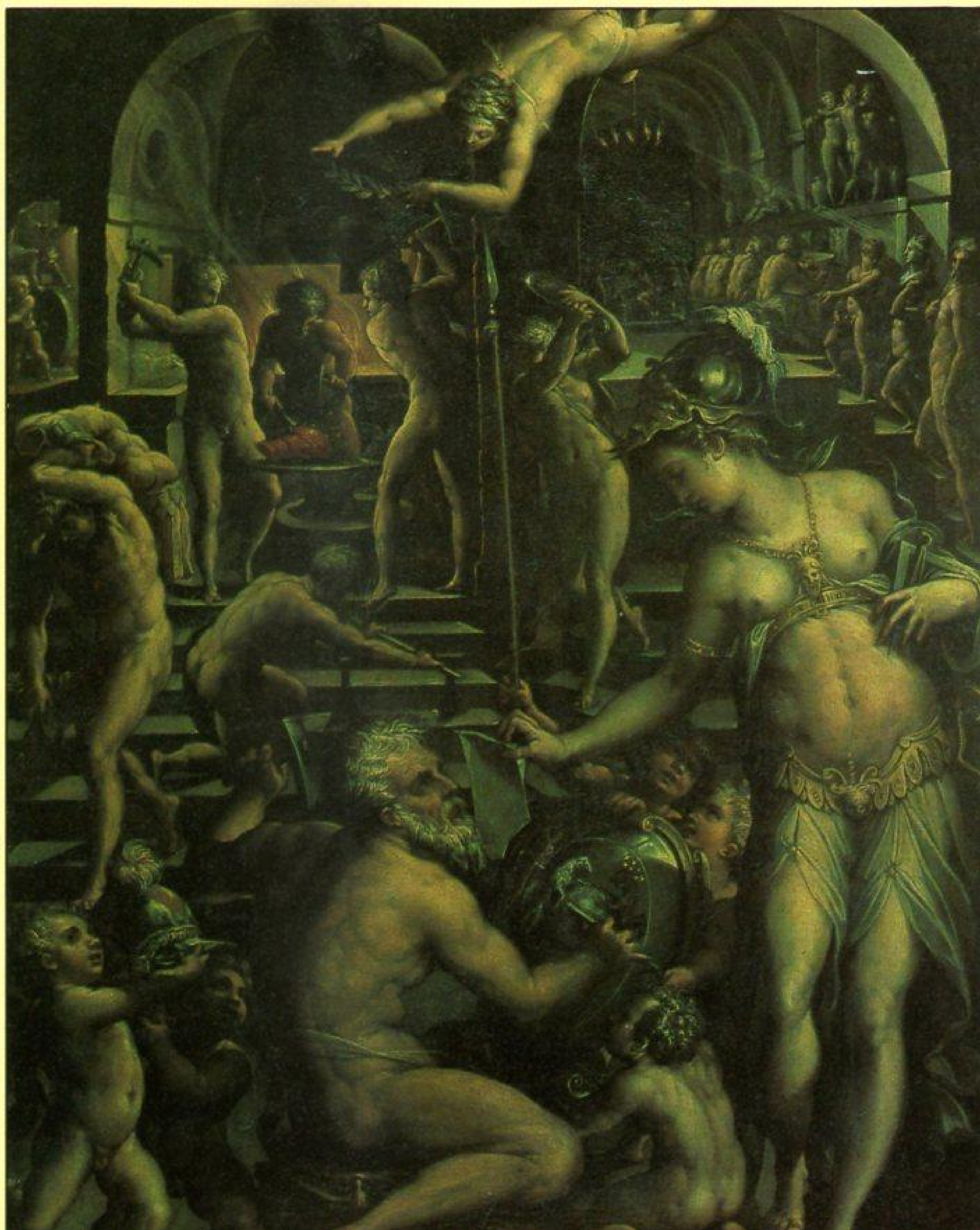
Las grandes civilizaciones clásicas del Mediterráneo se desarrollaron al pie de los volcanes. El mismo dios del fuego da nombre a la isla de Vulcano, situada al norte de Sicilia, en el mar Tirreno.

Los antiguos navegantes estaban acostumbrados a la extraña luz de estas montañas de fuego, pues a pocos kilómetros de Vulcano se encuentra otra isla volcánica, Stromboli, y más al sur, en la propia Sicilia, se alza el gigantesco Etna. El Vesubio domina amenazador la bahía de Nápoles, y más al este, en el mar de Creta, los restos destrozados de Santorín, o Tera, señalan el lugar donde se produjo una de las mayores explosiones volcánicas que ha conocido el Mediterráneo.

Para los pueblos que vivían en las laderas de estas montañas humeantes, las erupciones no sólo representaban un peligro físico, sino que también tenían un significado sobrenatural, ya que se consideraba que los responsables de las violentas manifestaciones volcánicas eran los dioses. En muchas partes de la Tierra donde los volcanes siguen esparciendo fuego y destrucción, todavía se teme a los dioses del mundo subterráneo.



Pele, feroz y vengativa diosa hawaiana del fuego, que, según la tradición, vive en el cráter de Kilauea. La figura de madera tiene cabello auténtico y ojos de concha.



Los antiguos griegos creían que las erupciones volcánicas eran obra del dios Hefesto, al que los romanos llamaron Vulcano, herrero de los dioses, que forjaba los rayos de Júpiter en su fragua instalada bajo el monte Etna. La lava arrojada por el volcán serían las brasas escapadas de la fragua del dios.
El italiano Giorgio Vasari (1511-1574) se inspiró en este antiguo mito para pintar su cuadro La fragua de Vulcano.

Energía del mundo subterráneo

Cuando los vikingos se acercaron en sus barcos a la costa de Islandia, sus ojos contemplaron un extraño espectáculo. Densas columnas de humo blanco se elevaban hacia el cielo, pero no se advertían llamas ni se veía persona alguna que pudiera haber encendido fuego.

Llamaron a aquel lugar Reykjavik —«la bahía del humo»—, pero al desembarcar descubrieron que las columnas blancas no eran de humo, sino de vapor.

La causa de aquel espectacular fenómeno eran los géiseres, que abundan en el paisaje islandés más que en ninguna otra parte del mundo. El nombre procede de un gigantesco surtidor de agua y vapor existente en Haukadalur, Islandia, al que los habitantes de la zona llamaban Geysir (probablemente derivado de *geysa*, antigua palabra nórdica que significa «chorro»), y que en otros tiempos alcanzaba alturas de 50 m, aunque en la actualidad permanece casi inactivo.

La razón de que en Islandia existan tantos géiseres es que la isla se encuentra sobre la dorsal atlántica central, donde dos grandes segmentos de la corteza terrestre se separan uno de otro, aumentando la distancia entre el Viejo Mundo y las Américas, en un proceso que viene ocurriendo desde hace muchos millones de años.

Al separarse las dos placas de la corteza, dejan una zona intermedia más fina, una línea débil por donde aflora el magma fundido, formando bolsas en la roca esponjosa.

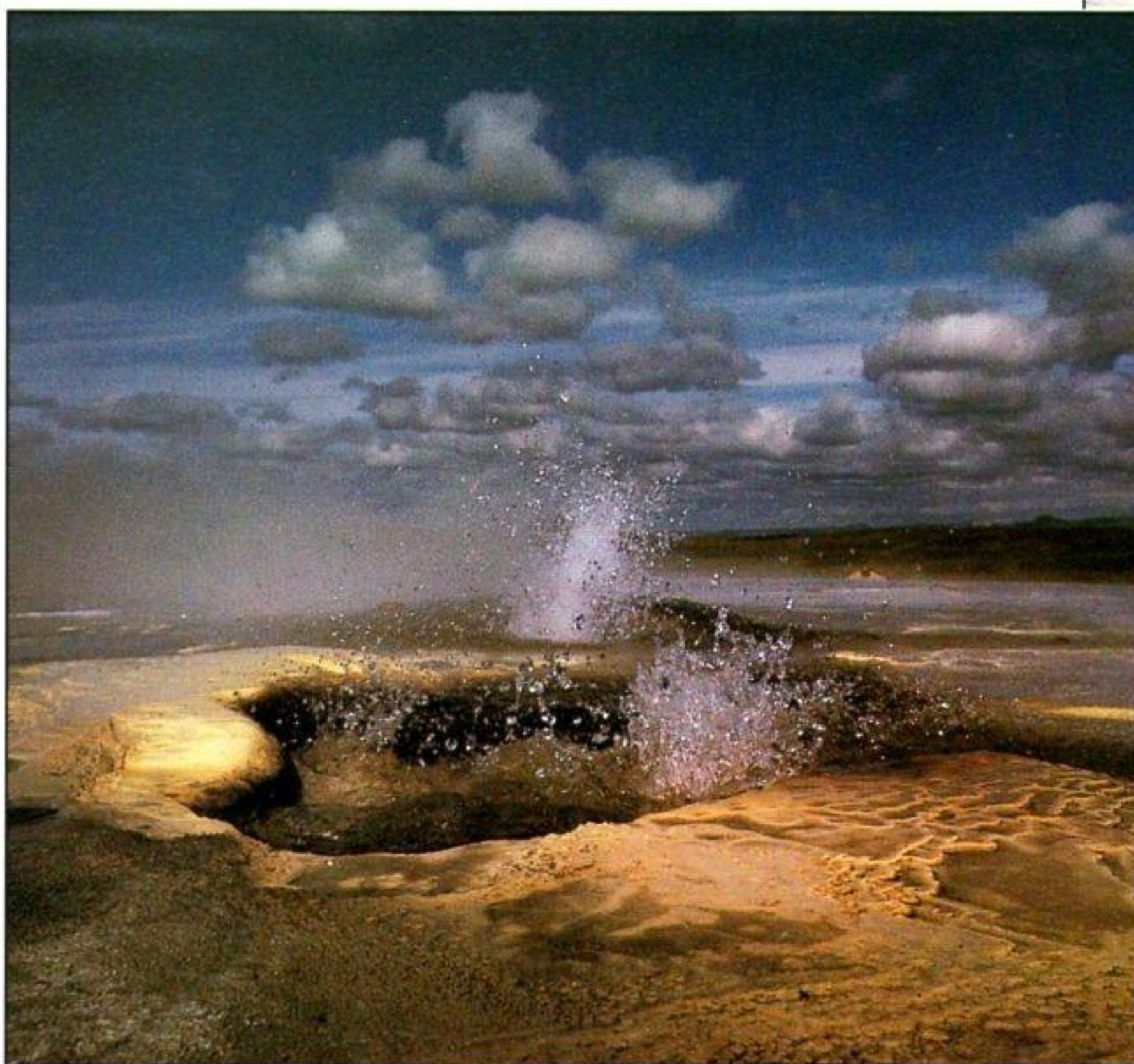
A partir de estas cámaras, el magma fluye hacia los lados a través de la corteza. Al hacerlo, calienta la roca que lo rodea, y el agua que se ha filtrado a través de la roca porosa entra en contacto con estas rocas calientes. Lo que sucede a continuación depende de las circunstancias concretas de cada caso.

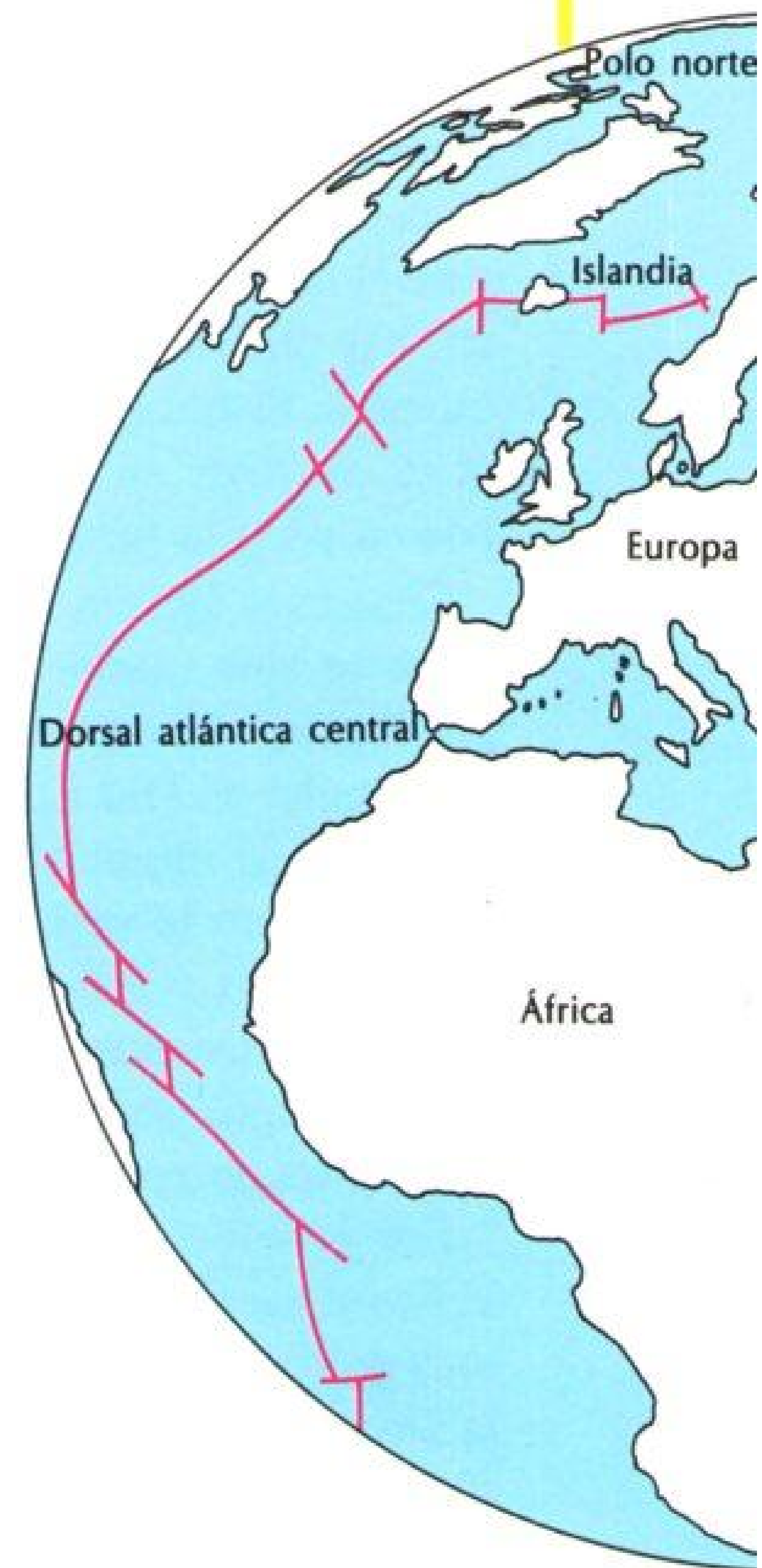
Si el agua puede escapar sin obstáculos hacia la superficie, forma un manantial termal o un estanque de fango hirviente. Pero si el agua ha quedado atrapada en la roca, puede calentarse muchísimo sin llegar a hervir, porque la enorme presión de las rocas que tiene encima impide que el vapor escape. El agua permanece en este caldero subterráneo, invisible desde la superficie, a menos que se encuentre debajo de un glaciar, en cuyo caso puede derretir el hielo, formando un lago.

En circunstancias intermedias entre estos dos extremos, el resultado es mucho más espectacular. Si el agua se encuentra parcialmente atrapada —lo suficiente como para impedir que hierva aunque la temperatura supere el punto de ebullición—, puede formarse un «frente de vapor» que acaba por liberar de manera explosiva el agua atrapada en el subsuelo. El resultado es un géiser, o una fumarola si lo único que acaba saliendo es vapor.

El funcionamiento exacto de la mayoría de los géiseres constituye un misterio, pero en el caso del Old Faithful («Viejo fiel») del parque de Yellowstone, EE.UU., los geólogos creen saber lo que está sucediendo en las profundidades de la Tierra. Sospechan que el Old Faithful tiene su origen en un

Grothrrmal, «el géiser rugiente» de Hvrravellir, Islandia, debe su nombre al sonido retumbante que produce antes de lanzar al aire un chorro de agua hirviente y vapor (abajo). *En algunos manantiales termales, los minerales disueltos en el agua se han ido depositando hasta formar espectaculares conos rocosos.*





Islandia está cortada en dos por la dorsal atlántica central, que marca la separación entre dos grandes placas de la corteza terrestre. A lo largo de esta dorsal, el magma fundido que surge de las profundidades de la Tierra calienta el agua subterránea, que sale a la superficie por los géiseres. El géiser más famoso de Islandia es el Strokkur, «La Lechera». A primera vista parece un estanque apacible, y sólo unas pocas volutas de vapor permiten sospechar su verdadero carácter. De pronto, el nivel del agua comienza a subir y bajar, y se forma una cúpula de agua transparente que estalla en un chorro de vapor y agua hirviente, que asciende hasta 30 metros de altura. Estas erupciones se producen a intervalos de nueve minutos.

largo tubo en forma de U que se llena de agua subterránea. En un extremo del tubo, a nivel más alto que el de la salida del géiser, hay una cámara vacía rodeada de rocas calientes. El agua que se filtra en esta cámara se convierte en vapor que va elevando poco a poco la presión de la cámara.

Cuando se alcanza una presión crítica, el vapor se abre camino empujando el agua por el tubo en forma de U. Según la creencia popular, el Old Faithful entra en erupción cada 65 minutos, con la exactitud de un reloj, pero la verdad es que los géiseres son algo más veleidosos. Incluso este modelo de lealtad puede permanecer inactivo durante largos períodos, mientras que otras veces entra en erupción cada media hora.

Los géiseres y manantiales termales de Yellowstone se encuentran en una antigua zona de actividad volcánica. Probablemente, la última erupción se produjo hace tan sólo 10.000 años. A esta fase de la lenta y agónica extinción de un volcán se la llama «fase de solfatara», en alusión a la aldea italiana de Solfatara, cerca de Pozzuoli, famosa en la antigüedad por sus manantiales termales y estanques de fango caliente. Pero lo que le sucedió a esta aldea demuestra que el estado de solfatara no ofrece garantías de que un volcán se encuentre definitivamente extinguido. En 1538, Solfatara quedó destruida por una colosal erupción de cenizas.

El agua caliente a presión es un poderoso disolvente, y al abrirse camino a través de la corteza terrestre va desgastando constantemente la roca. Al salir a la superficie, va cargada de minerales disueltos, que sedimentan cuando el agua se enfría. El contenido exacto de minerales depende de la clase de roca.

En ocasiones, los minerales extraídos de la tierra por una fuente termal son radiactivos, y pueden transmitir su radiactividad al agua o el fango.

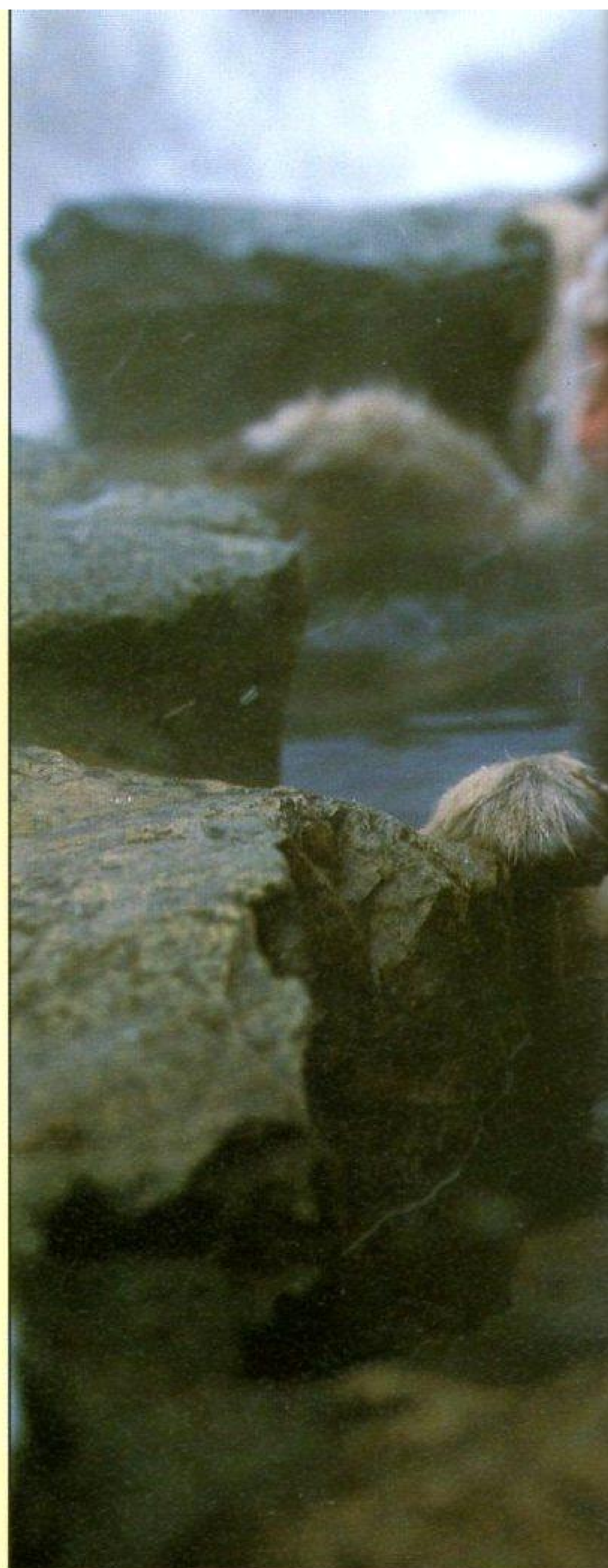
Las supuestas propiedades terapéuticas de estos manantiales o estanques pueden deberse a este factor, a los minerales contenidos en el agua, o sencillamente al calor, que puede contribuir a aliviar enfermedades como la artritis.

La localidad de Pammukale, Turquía, se convirtió en un centro de salud 190 años a. C., cuando Eumenes II, rey de Pérgamo, fundó la ciudad santa de Hierápolis, que prosperó bajo dominio griego y romano y adquirió fama por sus templos y sus termas sagradas. Sin embargo, había una parte de Hierápolis que no resultaba nada saludable: el Plutonium, una pequeña caverna con un riachuelo humeante sobre el que flota una neblina tóxica.

Los gases del Plutonium, que aún existe, son tan potentes que se dice que pueden matar a cualquier animal en cuestión de segundos. Se forman como subproducto ocasional de la alquimia subterránea de las fuentes termales, que pueden disolver diferentes tipos de roca y mezclar sus componentes, creando un producto activo de gran potencia.



Las bacterias y algas microscópicas que proliferan a temperaturas casi de ebullición forman franjas de colores brillantes en las aguas del Gran Manantial Prismático. Bajo las nubes de niebla que cubren el parque nacional de Yellowstone, en Wyoming, se extiende el campo de géiseres más grande y variado del mundo, con unos 300 géiseres y casi 10.000 manantiales termales y fumarolas.



Aprovechamiento de la energía de la Tierra

El calor del interior de la Tierra constituye una enorme reserva de energía, que deja pequeño el potencial de todos los combustibles fósiles del mundo. Hasta comienzos del siglo XX, este recurso permaneció sin explotar. En 1904 se inauguró en Larderello, Italia, la primera estación geotérmica, y desde entonces cada vez se ha utilizado más esta fuente de energía y calor no contaminante.

Los lugares más ricos en energía geotérmica son aquellos en los que el calor del subsuelo hace salir a la superficie vapor a altas temperaturas.

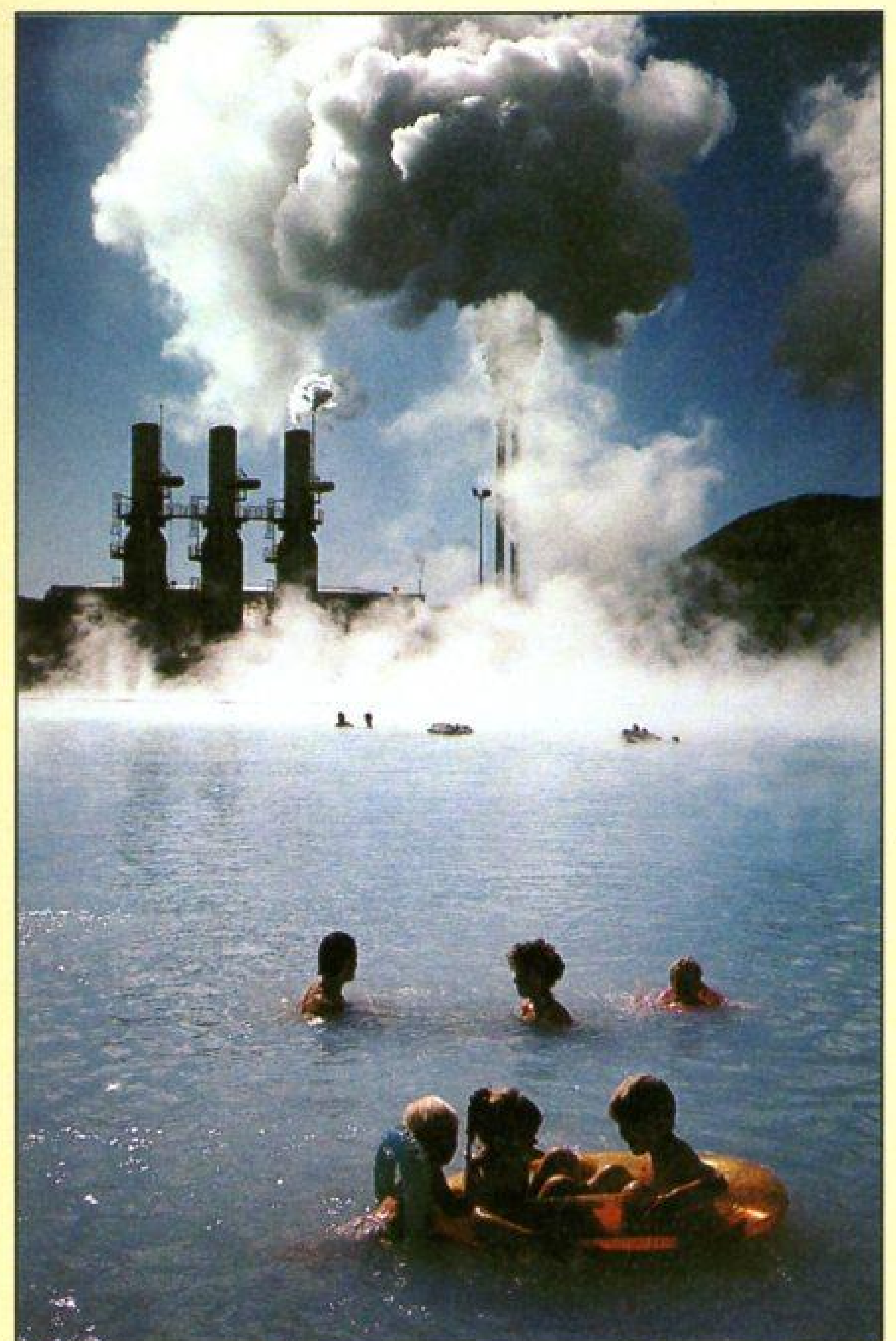
En la estación geotérmica de Los Géiseres, California, el vapor natural genera electricidad suficiente para abastecer a media ciudad de San Francisco.

Existen proyectos para construir estaciones



Los macacos que habitan en las montañas del norte de Japón han descubierto las delicias del baño caliente cuando la temperatura desciende por debajo de cero. Mientras ruge la ventisca, los monos se mantienen calientes sumergiéndose en los manantiales termales.

Sin las ventajas de la energía geotérmica, la vida en Islandia sería muy dura y fría. Pero aprovechando este recurso por medio de estaciones geotérmicas como la de Svartseng (abajo), los islandeses pueden disfrutar de todas las comodidades de la vida moderna, e incluso gozan del placer de bañarse durante todo el año en agua caliente al aire libre.



geotérmicas en otros lugares del mundo donde existen rocas calientes bajo la superficie, aunque no se forme vapor en condiciones normales. El sistema consistiría en abrir orificios para inyectar agua en la roca. Al contacto con la roca caliente, el agua herviría, y el vapor producido subiría por un segundo orificio y se emplearía para impulsar las turbinas.

En algunos lugares, como por ejemplo Islandia, la energía geotérmica produce grandes cantidades de agua caliente, que no se utiliza para generar electricidad, pero sí para calefacción.

Con un suministro casi ilimitado de agua caliente en los grifos, los islandeses disfrutan de calor en sus casas y pueden cultivar frutas y hortalizas en invernaderos climatizados geotérmicamente.

Ondas sísmicas y fallas letales

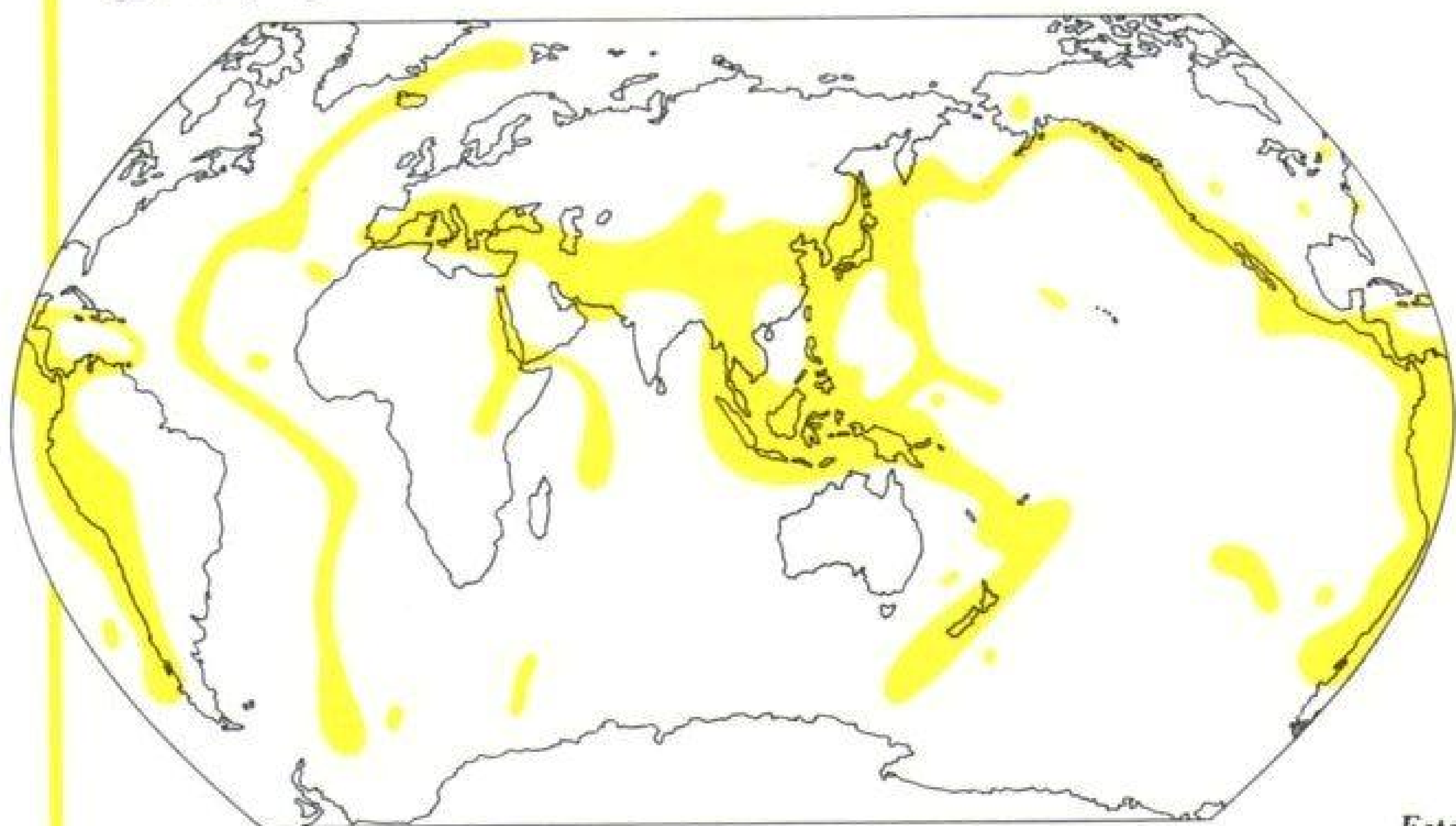
En 1835 se produjo un curioso fenómeno en la costa sur de Chile. En un solo movimiento convulsivo, toda la línea de costa se levantó, estabilizándose a más de un metro por encima de su posición anterior. Parecía que los barcos se hundían de repente al elevarse los embarcaderos, y los bancos de arena sumergidos se convirtieron en islotes. En algunos lugares, el elevamiento superó los 3 m, dejando fuera del agua grandes bancos de percebes y mejillones.

Las ondas sísmicas que acompañaron al levantamiento provocaron una terrible devastación. En el puerto de Valdivia, las casas de madera se desmantelaron, y el agua de la bahía subía y bajaba bruscamente, provocando fuertes remolinos que arrancaron de sus amarras a los barcos atracados.

Conocemos muchos detalles de estos sucesos porque fueron presenciados por Charles Darwin (1809-1882), que el 20 de febrero había desembarcado del buque explorador *Beagle*. El terremoto se produjo mientras él exploraba un bosque cercano. No sólo sintió miedo en el momento, sino que el sobresalto le duró muchos días. Lo que convierte la experiencia en aterradora es comprobar que la propia Tierra —el «emblema de la solidez», según las expresivas palabras de Darwin— puede de pronto estremecerse, echando abajo una de nuestras ideas preconcebidas más fundamentales. A eso se debe el peculiar carácter amenazador de los terremotos.

Lo mismo que las erupciones volcánicas, los terremotos no se producen al azar, en cualquier punto de la superficie terrestre. En algunas partes del mundo, los pequeños temblores son frecuentes, y a menudo ni se les presta atención. Sin embargo, sobre esos mismos lugares se cierne constantemente la amenaza de terremotos más violentos. A lo largo de los siglos, han entrado a formar parte de las leyendas y tradiciones. Y todavía siguen provocando terror en los humanos.

La búsqueda de una explicación al fenómeno de los terremotos se remonta a mucho antes de que empezara a registrarse la historia. Nos han llegado innumerables mitos de los pueblos antiguos, muchos de los cuales tienen un tema en común: su idea central es que la Tierra se encuentra sobre el lomo de algún animal gigantesco, y que los movimientos de esta enorme criatura provocan los terremotos.

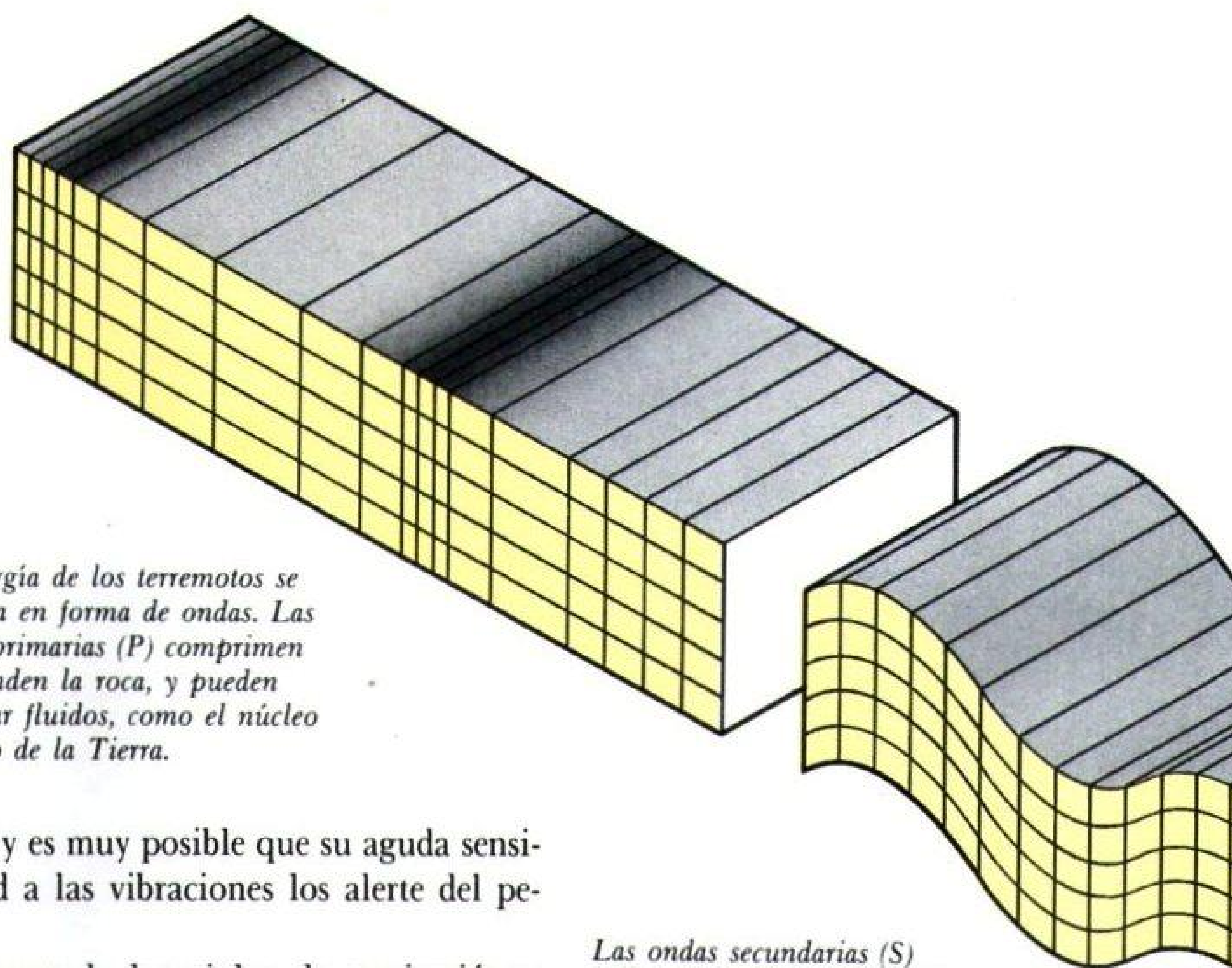


La mayoría de los terremotos tienen lugar en los bordes de las placas tectónicas, cuando dos de ellas se deslizan una junto a otra o chocan de frente, como sucede en la cordillera del Himalaya.



Esta casa de San Francisco, construida sobre la falla de San Andrés, muestra los efectos del imprevisible poder de los terremotos.





La energía de los terremotos se desplaza en forma de ondas. Las ondas primarias (P) comprimen y expanden la roca, y pueden atravesar fluidos, como el núcleo fundido de la Tierra.

Las ondas secundarias (S) sólo se desplazan a través de la roca, sacudiéndola de arriba abajo o de lado a lado.

En América del Sur, Darwin escuchó una explicación diferente del terremoto de 1835, que se aproximaba más a la comprensión de las verdaderas fuerzas que actúan. Según esta interpretación, el terremoto lo había provocado una anciana que, por medios misteriosos, había taponado el cráter de un volcán cercano. El volcán así amordazado no podía expresar su furia más que de una manera: sacudiendo la tierra en lugar de vomitar fuego. La historia contenía un atisbo de verdad, y puede que se basara en la observación de los cambios repentinos que se producen en la actividad volcánica inmediatamente antes de un terremoto.

Desde los albores de la historia, los humanos han tratado de encontrar algún tipo de pauta aplicable a los terremotos que permitiera predecir el desastre inminente. Los portentos que presuntamente anunciaban un terremoto eran muchos y muy diversos, e incluían desde ominosas señales astrológicas y fases poco propicias de la luna, hasta repentinas fluctuaciones del nivel del agua en los pozos, luces misteriosas en la tierra, mal olor del aire, formaciones extrañas de las nubes y reacciones insólitas por parte de los animales.

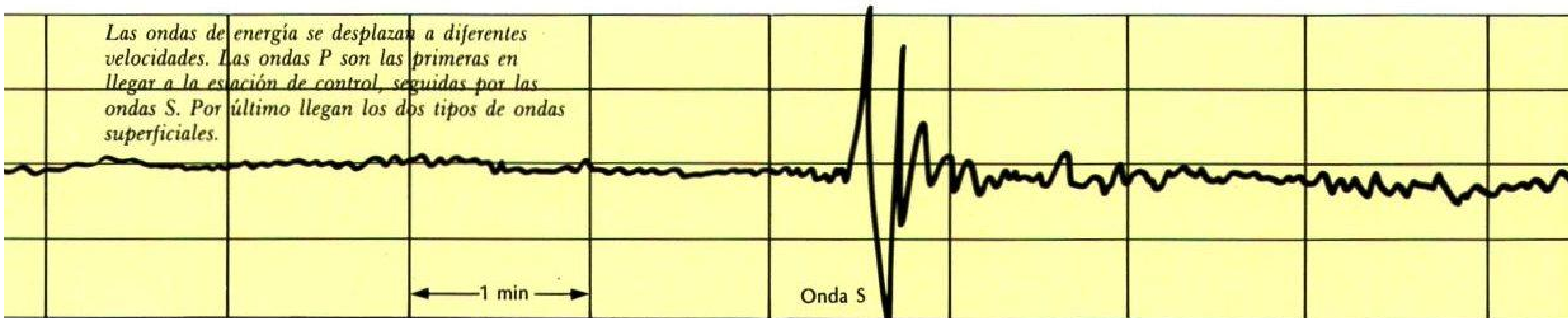
Aunque los sismólogos modernos descartan la idea de que estrellas situadas a millones de años-luz de distancia puedan ejercer influencia alguna en los movimientos de la corteza terrestre, otras hipótesis tradicionales están siendo objeto de concienzudas investigaciones. Algunos sismólogos han sugerido que la atracción gravitatoria de la luna puede influir de manera sutil en la iniciación de terremotos. Los cambios en el nivel del agua pueden reflejar movimientos en las profundidades de la corteza, y a veces van acompañados por escapes de gases sulfurosos y perturbaciones eléctricas. Se conocen numerosos casos, bien documentados, de animales que huyen antes de un terremoto, y es muy posible que su aguda sensibilidad a las vibraciones los alerte del peligro.

A pesar de los siglos de teorización y observación, la predicción de terremotos continúa en la infancia. Se han logrado salvar algunas vidas mediante predicciones a corto plazo, pero las previsiones que abarcan meses o años siguen siendo demasiado generales para que tengan utilidad inmediata.

Sin embargo, la medición de los terremotos se ha perfeccionado hasta un nivel muy alto. Desde que los chinos inventaron los primeros sismógrafos, se han desarrollado instrumentos que permiten medir con gran precisión la intensidad de un terremoto y determinar con exactitud su origen. En la actualidad se utilizan varias escalas para medir la intensidad, pero la más usada es la de Charles F. Richter (1900-1985).

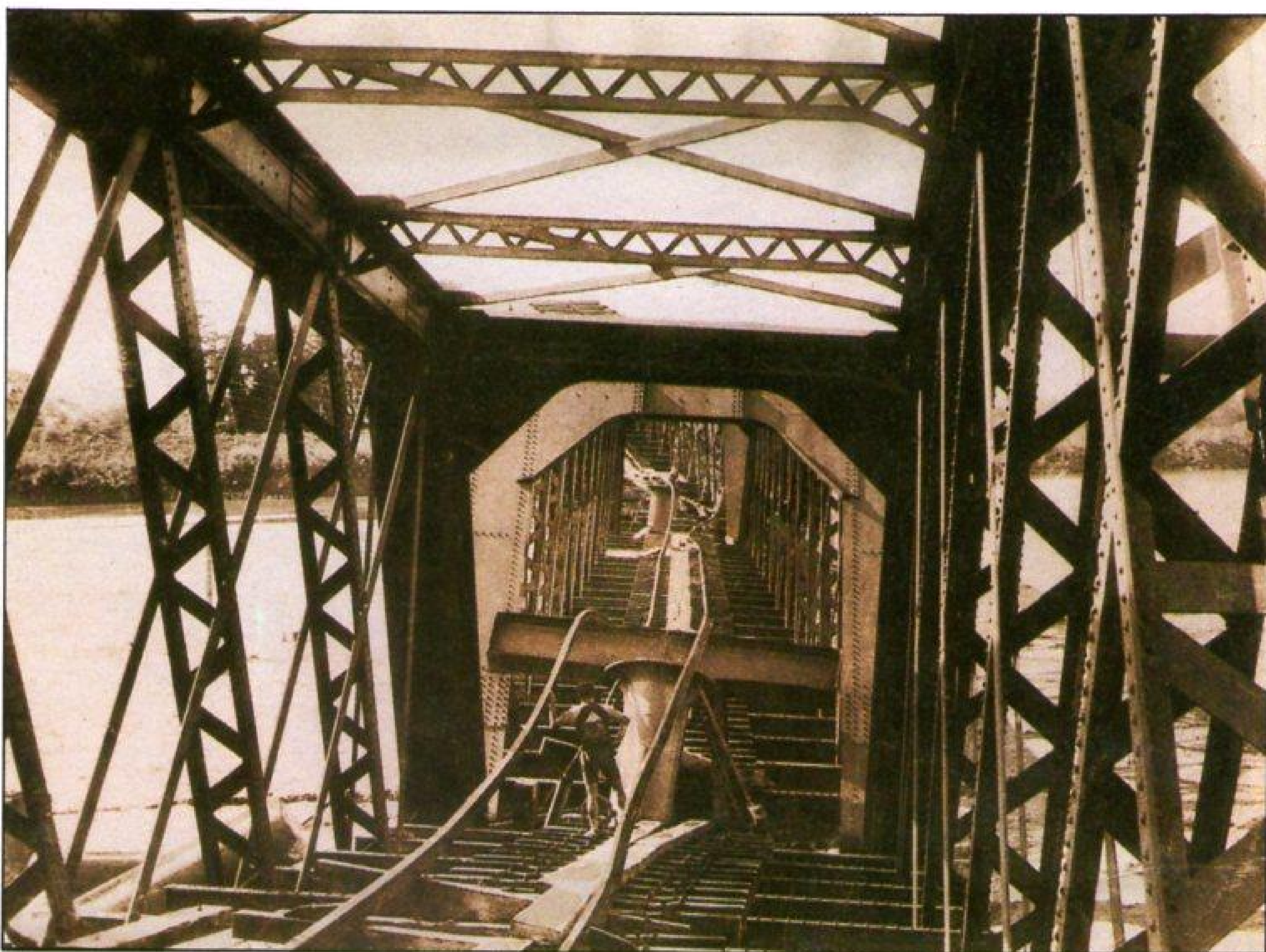
El hecho de que algunas partes del mundo sufran frecuentes terremotos, mientras que otras no los sufren nunca, impulsó al ingeniero irlandés Robert Mallet (1810-1881) a elaborar un mapa de las zonas sísmicas del mundo. Aunque él no tenía posibilidad de saberlo, su mapa demuestra con toda claridad que estas zonas, lo mismo que las zonas volcánicas, se encuentran concentradas a lo largo de las fronteras entre las placas tectónicas de la corteza. Ahora sabemos que es la colisión o separación de estas placas lo que provoca las ondas sísmicas, que a su vez dan lugar al terremoto.

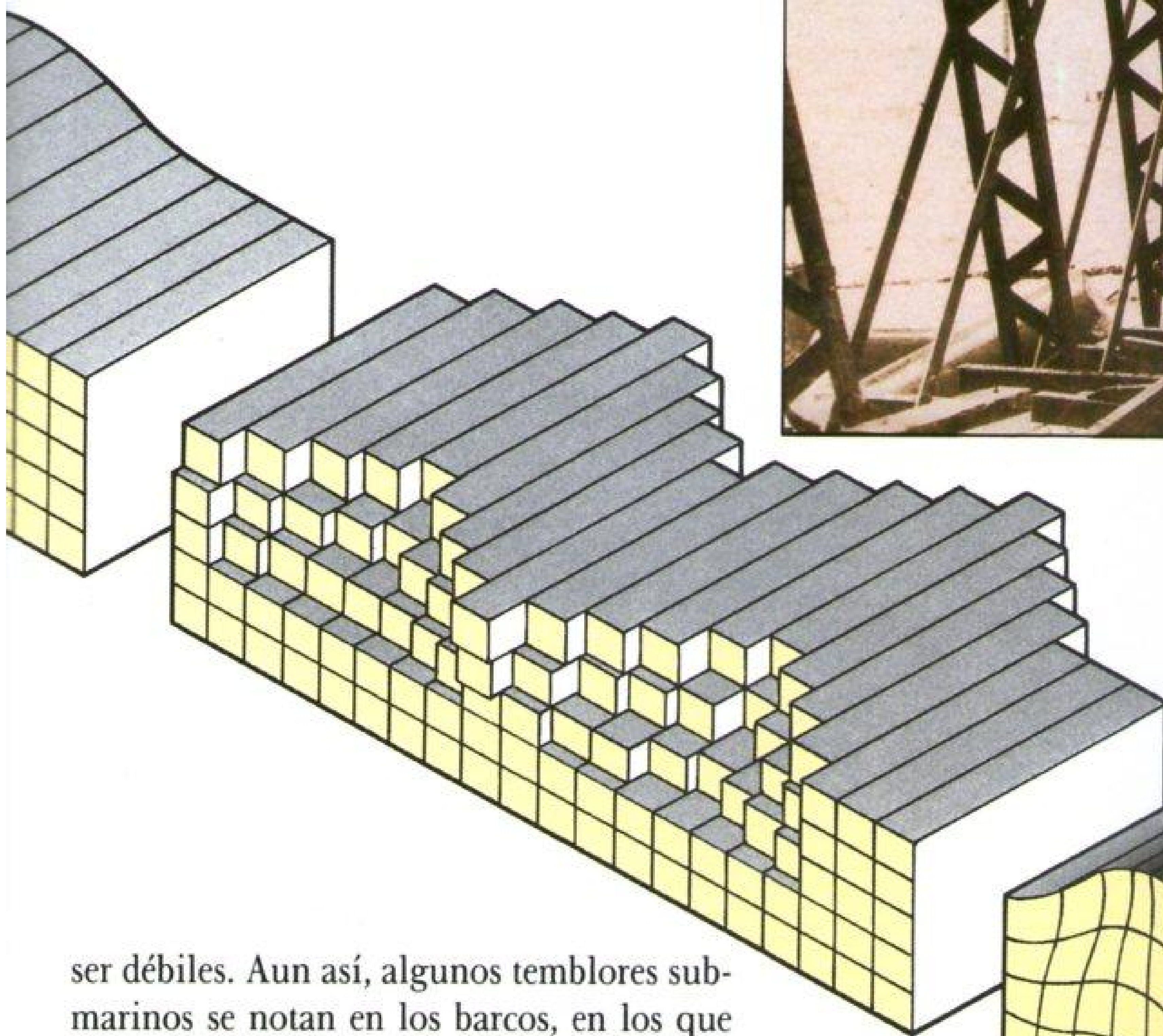
La mayoría de los temblores de tierra pasan completamente inadvertidos. Aparte de la multitud de temblores de muy baja intensidad, muchos de ellos se producen en zonas deshabitadas o bajo el mar, donde constantemente se forman nuevas secciones de la corteza mientras las placas se separan. En estas zonas los temblores son frecuentes, pero como se originan cerca de la superficie, en roca relativamente flexible, suelen

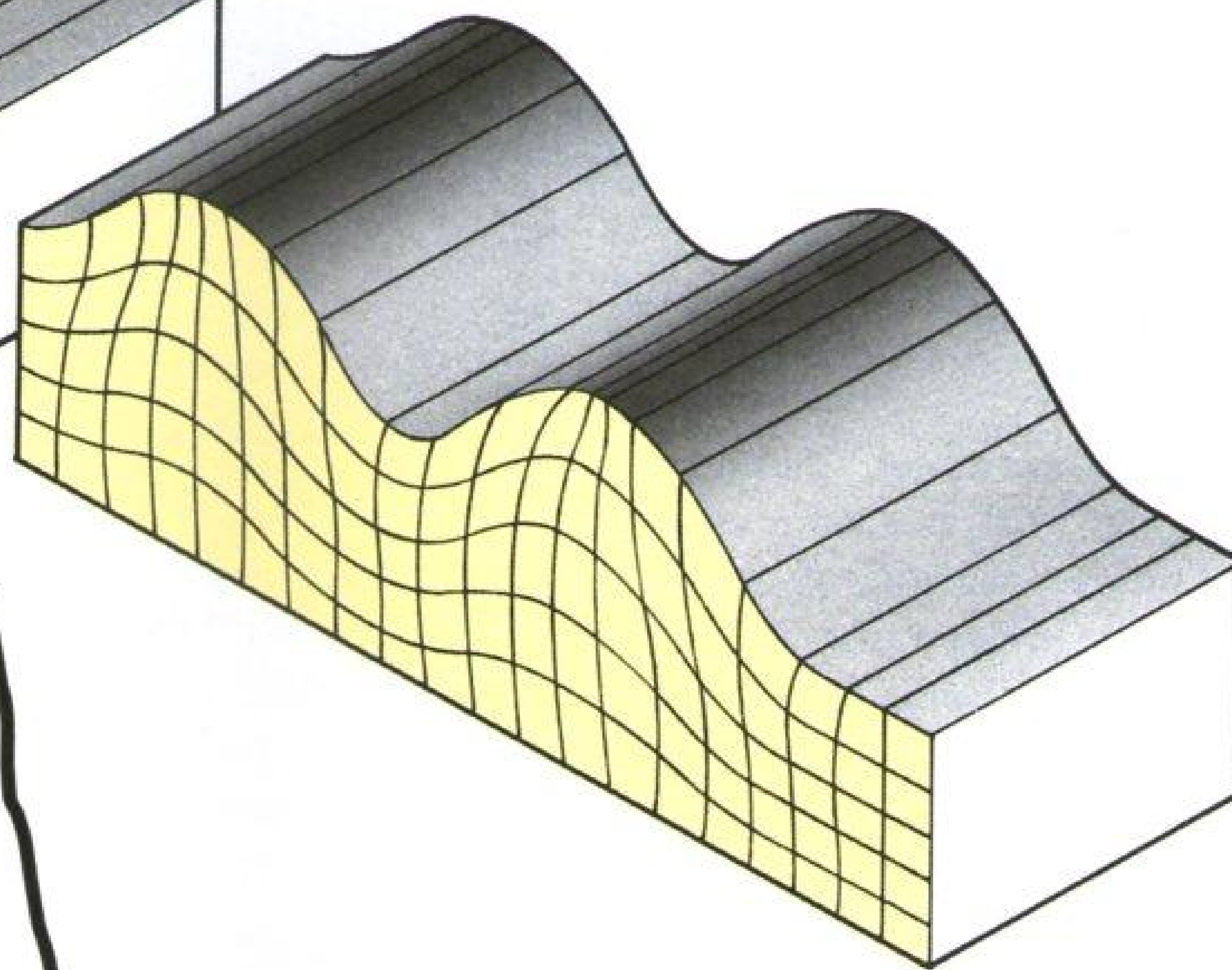


Las ondas de energía se desplazan a diferentes velocidades. Las ondas P son las primeras en llegar a la estación de control, seguidas por las ondas S. Por último llegan los dos tipos de ondas superficiales.

Un amasijo de vigas fracturadas y raíles doblados es todo lo que queda de un puente de la línea Nagara-Gawa después de un catastrófico terremoto. Japón es uno de los países del mundo más vulnerables a los terremotos, ya que se encuentra en una zona de subducción, en la que las placas del Pacífico y de las Filipinas se hunden bajo la enorme placa de Eurasia.



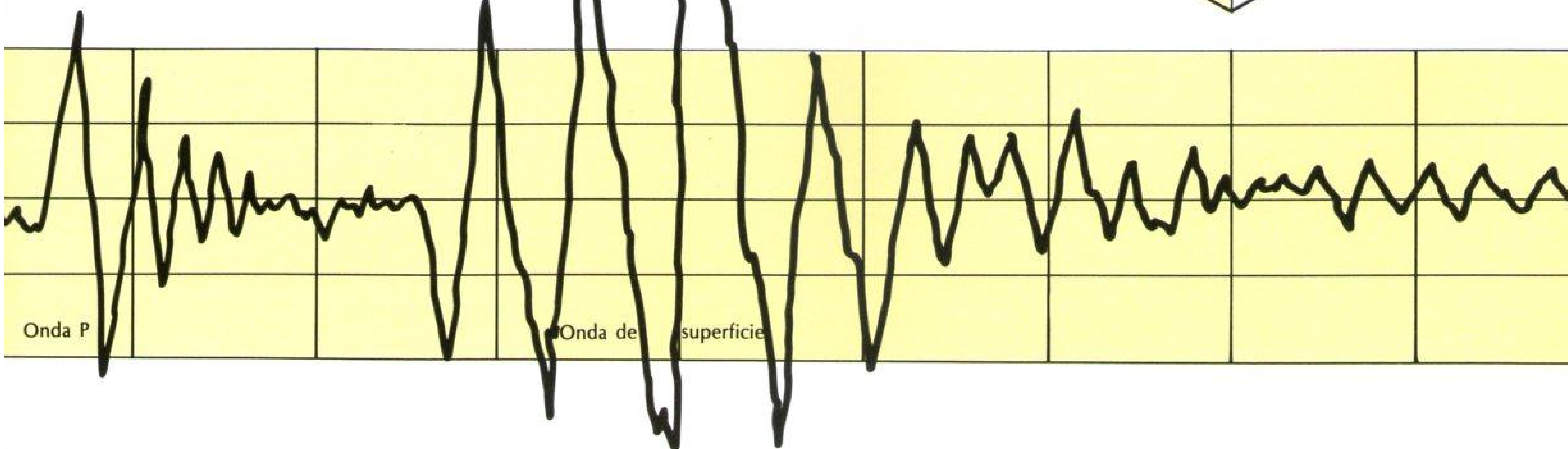




Las ondas de Love (izquierda) *y las de Raleigh* (abajo) *son ondas de superficie, que provocan, respectivamente, un movimiento de lado a lado y otro de oscilación.*

ser débiles. Aun así, algunos temblores submarinos se notan en los barcos, en los que las ondas sísmicas provocan sacudidas.

Sin embargo, el choque entre dos capas de la corteza provoca terremotos mucho más intensos. Aunque el desplazamiento relativo de las placas adyacentes no pase de 2 cm al año, la energía de este desplazamiento es colosal. Si la fricción entre las placas impide el movimiento gradual, se va acumulando la tensión hasta que alcanza un nivel





capaz de vencer la fuerza de la fricción. De pronto, en una única sacudida, se libera una enorme cantidad de energía —muchas veces superior a la de la mayor bomba atómica— que emite ondas sísmicas que se desplazan a través de la roca a velocidades de hasta 800 km por hora.

Los terremotos más intensos del mundo se producen cuando una placa se mete debajo de otra. En estos puntos de contacto entre placas pueden originarse terremotos a profundidades de hasta 700 km bajo la superficie, cuando las dos placas rocosas chocan con un movimiento imperceptible pero imparable.

Los temblores profundos de este tipo son muy frecuentes en las márgenes del Pacífico, donde las placas que forman el fondo del océano se ven empujadas a meterse por debajo de las que forman los continentes y las cadenas de islas. A veces, estos movimientos en las profundidades de la corteza se notan en la superficie, y de manera espectacular: en 1923, por ejemplo, el fondo marino de gran parte de la costa japonesa descendió más de 100 m.

Las fuerzas desencadenadas por estos temblores profundos son tan enormes que las ondas sísmicas pueden provocar estragos en la superficie. En términos humanos, los daños más graves no suelen producirse en el epicentro del terremoto —el punto de la superficie situado directamente encima del punto de origen—, sino a cierta distancia del mismo.

En 1985, la placa de Cocos, situada en el fondo del océano Pacífico, avanzó metiéndose por debajo de la placa adyacente, la de América del Norte, frente a la costa de México. El temblor se produjo a muchos kilómetros por debajo de la costa. Como sucede en todos los terremotos, las ondas sísmicas se desplazaron en todas direcciones, no sólo hacia arriba —o sea, hacia el epicentro—, sino también hacia abajo y hacia los lados.

Fueron las ondas laterales las que provocaron la terrible catástrofe de Ciudad de México, situada a 400 km al noreste del punto de origen del terremoto. La ciudad, fundada en tiempos de los aztecas, se construyó en terreno elevado en medio de un lago, pero a lo largo de los siglos las aguas del lago fueron menguando hasta que sólo quedó cieno sedimentado. Cuando llegaron las ondas sísmicas, el cieno resonó como un tambor. La sacudida fue tan fuerte que se hundieron casas, hoteles, bloques de oficinas y hospitales, provocando la muerte de más de 10.000 personas.

En algunas partes del mundo, las placas de la corteza terrestre pueden no chocar de frente, sino deslizarse una al costado de la otra, pulverizando la roca y dejando líneas de falla, como gigantescas cuchilladas en la superficie de la tierra. Existen centenares de estas fallas, pero sin duda la más conocida es la falla de San Andrés, que atraviesa California.

La falla de San Andrés señala el punto de contacto de la placa del Pacífico con la de América del Norte. La placa del Pacífico no sólo ocupa el fondo del mar, sino que sostiene parte de la costa californiana. El fondo marino y la costa forman una sola unidad que se desplaza hacia el norte a razón de 5 cm por año.

En algunos lugares, el movimiento es dificultoso. La costa y la placa continental se rozan, provocando numerosos temblores pequeños que se denominan «sacudidas de deslizamiento». En la línea de contacto entre las dos masas de tierra en movimiento se observan extraños efectos que indican el desgarramiento del suelo. Ríos y arroyos se desvían de pronto en ángulo recto cuando su cauce es cortado por la falla, y las vallas se tuercen y deforman.

Pero en otros lugares, las placas quedan trabadas. Durante años no se produce ningún movimiento y, de pronto, la placa del Pacífico recupera el tiempo perdido, destru-

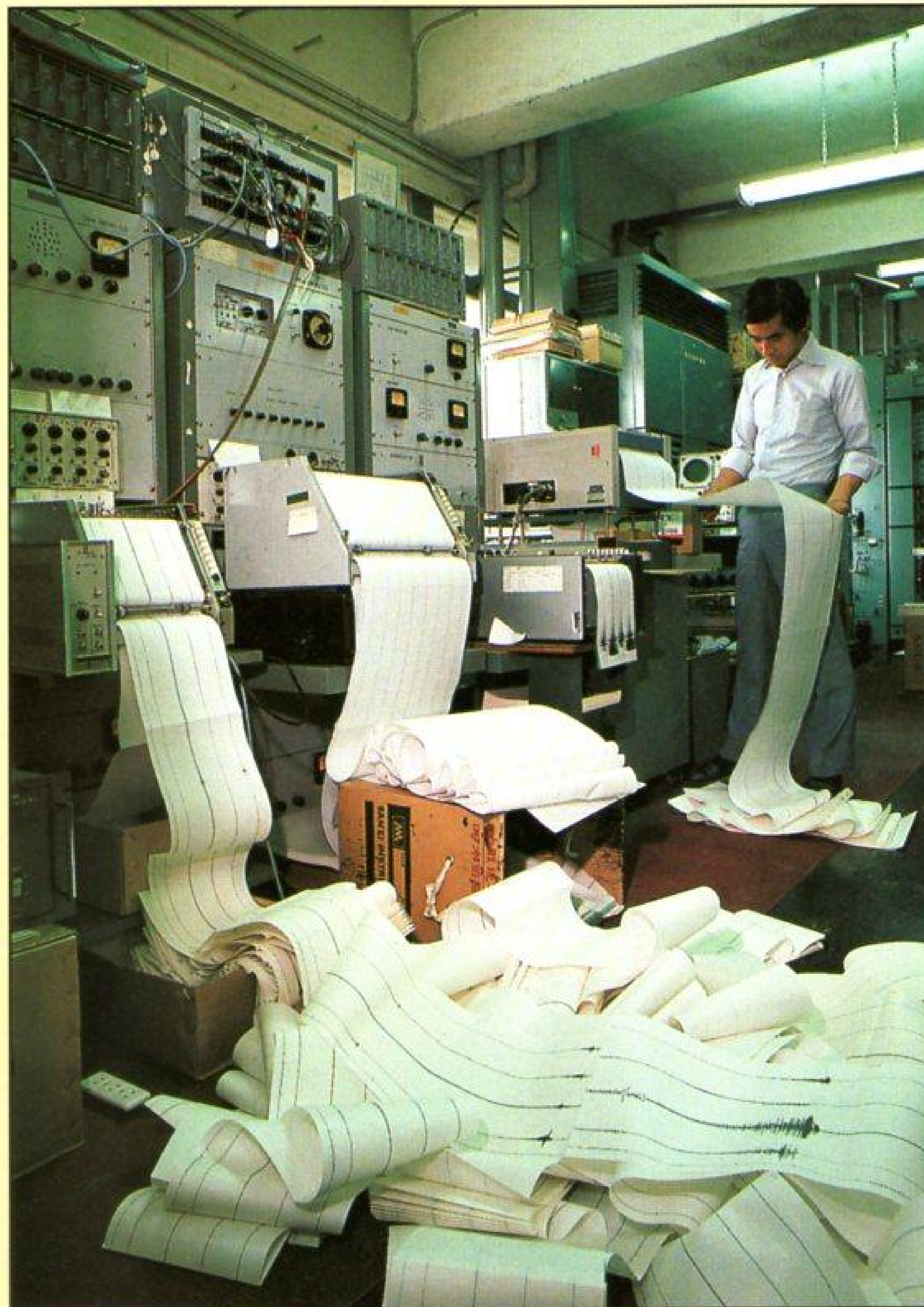
Según las leyendas japonesas, los terremotos los provoca Namazu, un pez gigantesco que vive semienterrado en el fango del fondo del mar, inmovilizado por una enorme piedra con poderes mágicos y vigilado por el dios Kashima. Pero en cuanto Kashima se descuida, Namazu se pone a hacer de las suyas. En la ilustración, el dios amonesta a los pequeños namazu, que representan terremotos anteriores.

Medición de los terremotos

La predicción de terremotos es todavía muy incierta, aunque la tecnología moderna ha permitido a los sismólogos —los científicos que estudian los terremotos— ampliar poco a poco sus conocimientos acerca de estas catastróficas convulsiones de nuestro planeta. Resulta mucho más fácil medir la intensidad de los terremotos, es decir, la cantidad de energía que liberan.

La escala más utilizada es la de Richter, ideada en los años treinta por el norteamericano Charles F. Richter. Se trata de una escala logarítmica, en la que cada paso de una unidad de magnitud representa una intensidad 10 veces mayor. El terremoto más intenso que se ha registrado tuvo lugar en Japón en 1933, con un valor de casi 9 en la escala Richter. El que se produjo en San Francisco en 1989 tuvo una intensidad aproximada de 7, es decir, 100 veces menor.

Existe otro sistema de medición, la escala Mercalli, que va del valor I al XII, y mide los terremotos en función de sus efectos. Los temblores de intensidad IV se sienten en el interior de las casas; los de intensidad VII provocan el hundimiento de algunos edificios; y un terremoto de intensidad XII significa la devastación completa.



En las zonas de alto riesgo, como Japón, los sismólogos vigilan constantemente los movimientos de la Tierra. Numerosos instrumentos de gran sensibilidad trazan gráficos de las ondas sísmicas que reflejan hasta los temblores más insignificantes.



El primer científico que intentó detectar terremotos a distancia fue el astrónomo chino Chang Heng en el siglo II. Para ello construyó este ingenioso aparato, con unos dragones que sostienen entre sus dientes bolas metálicas. La vibración de la Tierra hace caer la bola más próxima en la boca abierta de la rana, indicando la dirección del temblor.



En 1906, el roce subterráneo de las placas a lo largo de la falla de San Andrés derrumbó cientos de edificios de San Francisco, entre ellos el Ayuntamiento (izquierda). *El terremoto provocó además numerosos incendios que arrasaron la ciudad.*



Durante el terremoto de 1989, los edificios que más sufrieron fueron los de estilo antiguo. Los modernos rascacielos, diseñados para resistir los temblores de tierra, quedaron intactos. A la izquierda de la fotografía, el edificio piramidal de la Transamerica, de 260 metros de altura, con soportes triangulares y pilares de acero en la base.

yendo sin esfuerzo aparente edificios y puentes al avanzar hasta 10 m en un solo y devastador salto. Uno de los mayores desplazamientos de este tipo tuvo lugar en 1906, con efectos catastróficos: San Francisco se vino abajo por efecto del terremoto, y a continuación fue pasto de las llamas. Durante el resto del siglo, los californianos han aguardado con aprensión el próximo gran terremoto.

En 1989, el terremoto que afectó de nuevo a San Francisco provocó daños por valor de miles de millones de dólares, derribando edificios y carreteras elevadas. A pesar de su intensidad —7,1 en la escala Richter—, murieron menos de 300 personas. Pero este terremoto no era «El Grande» que todos esperaban y temían; si se produjera uno de estos saltos de la falla cerca de una de las ciudades californianas, la catástrofe podría ser mucho peor.

Cuando se produce un terremoto, los que sufren sus efectos sienten la compulsión de escapar a terreno abierto. Y hacen bien, porque incluso un terremoto violento resulta relativamente inofensivo en el campo. El desastre se produce cuando el terremoto afecta a una zona urbanizada. Los edificios pueden ofrecer protección contra los elementos, pero en estos casos, a menos que estén especialmente diseñados, se convierten en trampas mortales.

Al crecer la población humana, se han ido construyendo cada vez más ciudades en zonas sísmicas, a veces con resultados desastrosos. Uno de los terremotos más catastróficos que se han dado en Europa tuvo lugar cerca de Lisboa, ciudad situada en proximidad del punto de encuentro de la placa de Eurasia con la de África.

En 1755, Lisboa era la próspera y populosa capital de un imperio que se extendía de una orilla a otra del Atlántico, hasta Brasil. El terremoto se produjo el 1 de noviembre, fiesta de Todos los Santos, cuando la mayor parte de la población se encontraba en la iglesia. Las primeras ondas hicieron salir a las aterradas congregaciones, pero las calles eran tan estrechas que no pudieron escapar. En cuestión de minutos, las siguientes ondas hicieron desplomarse edificios enteros.

Se formaron olas gigantescas en el estuario del Tajo, inundando los muelles y arrastrando a las personas que habían buscado refugio a la orilla del mar. Para redondear la catástrofe, estallaron incendios que consumieron las ruinas, aumentando el número de víctimas hasta un total de 50.000.

Durante los tres siglos transcurridos desde la destrucción de Lisboa, numerosas ciudades han sufrido los efectos devastadores de un terremoto. Parece milagroso que sólo murieran 700 personas en el terremoto de San Francisco de 1906. En cambio, en Tokio se perdieron más de 100.000 vidas en 1923, a consecuencia de un terremoto y los incendios consiguientes. Los edificios de la ciudad estaban construidos con materiales ligeros, para que resultaran más seguros en caso de terremoto, pero esto mismo los hacía muy inflamables. El temblor derribó numerosas cocinas, y barrios enteros desaparecieron, tras haber sido devorados por las llamas.

Pero incluso esta catástrofe queda empequeñecida en comparación con la que se abatió sobre la ciudad china de Tangshan en 1976. Tangshan, situada entre Pekín y el mar Amarillo, con una población de casi un millón de habitantes, carecía de historial sísmico. Pero en la madrugada del 28 de julio, cuando casi todos sus habitantes dormían, un gigantesco temblor redujo a escombros las casas, bloques de apartamentos y fábricas. Los primeros informes hablaban de 750.000 víctimas, pero tres años más tarde las autoridades chinas rebajaron la cifra a 250.000. Probablemente nunca se

llegará a saber el número exacto de fallecidos.

Se calcula que para el año 2000 habrá más de 100 ciudades con poblaciones superiores a dos millones de habitantes, y por lo menos una docena de «superciudades» con más de diez millones.

Casi la mitad de estas ciudades —incluyendo México, Tokio, Pekín y Los Ángeles— se encuentran cerca de las líneas de contacto entre placas, donde el peligro de terremotos es mayor.

No hay modo de impedir un terremoto, como tampoco se puede trasladar una ciudad. La única manera de evitar el desastre es perfeccionando nuestra capacidad de predecir estas cataclísmicas convulsiones de la corteza terrestre.

En el próximo milenio se verá si el hombre moderno es capaz de adaptarse a este antiquísimo peligro.



La zona central de México capital está construida sobre el fondo de una antigua laguna, cubierto de sedimentos acumulados durante siglos. En septiembre de 1985 se produjo un terremoto que provocó vibraciones en las capas de sedimento, de la misma frecuencia que las de los edificios convencionales de muchos pisos, ocasionando el hundimiento de más de mil de ellos. La futura seguridad de la ciudad depende de que se construyan edificios diseñados para resistir las vibraciones de los temblores de tierra.

Tsunami: la ola gigante

Era una tarde tranquila de noviembre de 1837, y no se advertía en la playa de Kahului, en la isla hawaiana de Maui, ningún indicio de desastre inminente. De pronto, el mar empezó a retirarse de la bahía, sin ruido pero a gran velocidad, como si todo el océano se estuviera vaciando en un inmenso agujero. Los peces, sorprendidos por la desaparición del agua, coleteaban indefensos en el suelo. Muchas personas, atraídas por este golpe de suerte, corrieron a recoger el pescado varado. Pero otras tuvieron un presentimiento de lo que significaba la retirada del mar: un tsunami estaba en camino.

Espoleados por el miedo, algunos echaron a correr tierra adentro. Un aldeano llegó a lo alto de la cuesta que domina Kahului y, al oír el rugido del océano a sus espaldas, volvió la cabeza y contempló un espectáculo increíble: personas, casas, canoas y animales atrapados en una negra y enorme masa de agua enfurecida. El tsunami arrastró todo Kahului a 240 m tierra adentro.

La imagen popular de un tsunami es una versión magnificada de las familiares olas que azotan las costas de todo el mundo. Solemos imaginarlo como un gigantesco muro de agua que penetra tierra adentro, cerniéndose sobre árboles y edificios, para luego desplomarse sobre ellos cuando la ola rompe. Pero, como indica la experiencia de los aldeanos de Kahului, la mayoría de los tsunamis no son paredes de agua, sino una súbita elevación del océano.

Pasada la subida, el océano se retira tan rápidamente como llegó, a menudo con un terrible ruido de succión, llevándose a sus víctimas. La succión es tan poderosa que ningún nadador es capaz de resistirla. Pero esto no significa el fin del desastre. También es falsa la idea popular del tsunami como una única ola apocalíptica. Los tsunamis se producen en series de doce o más olas, y no hay manera de saber cuál de ellas será la mayor. Entre una ola y la siguiente, el intervalo puede ser de tan sólo cinco minutos, o de hasta una hora. En ocasiones,



Los japoneses tienen una amplia experiencia con los tsunamis, que azotan sus costas con frecuencia. Este grabado del artista Hokusai, titulado La ola, *trasmite con terrible intensidad la angustia de los hombres que se encuentran a merced de la ola gigante. Por muy fuerte que remen, no podrán escapar de la fuerza implacable que avanza hacia la costa.*



el tsunami sí produce un efecto de «pared de agua», similar al de una ola de marea; pero esto sólo ocurre si la ola penetra en una ensenada estrecha y en un ángulo concreto.

Uno de los aspectos más curiosos de los tsunamis es que en alta mar pueden pasar bajo un barco sin que se note, pues resultan indistinguibles de las olas normales.

En realidad, la causa del problema está en la topografía del fondo marino y de la costa. Cuando el tsunami se encuentra con islas pequeñas o con ciertos tipos de costa, su energía se disipa con un efecto mínimo. Pero donde existen bahías y ensenadas, con una pendiente gradual en el fondo, la prodigiosa fuerza del tsunami se canaliza en un espacio reducido y confinado por la costa, hasta que alcanza el punto de ruptura.

En algunos lugares especialmente desafortunados, dos partes diferentes de la costa reflejan las ondas del tsunami, que caen entonces sobre un tercer punto con su fuerza amplificada. Como una lente de aumento que concentra los rayos del sol, la costa enfoca el tsunami sobre un punto, donde el agua se alza, tragándose la costa con espantosa violencia.

El secreto de la terrible potencia del tsunami radica en su profundidad. Otras olas son como ligeros murmullos en la superficie del agua, agitada por el viento y las tormentas. La pulsación del tsunami atraviesa el océano desde el fondo hasta las aguas superficiales. El efecto en la superficie es muy ligero: un pequeño e inapreciable ascenso y descenso al paso del tren de ondas del tsunami. El ascenso no supera los 20 ó 30 cm, y aunque el tren de ondas se desplaza a la velocidad de un reactor, a 700 km por hora, su avance pasa inadvertido entre el oleaje. Sólo al llegar a una plataforma costera con pendiente gradual el tsunami se da a conocer.

La mayoría de los tsunamis se originan en el núcleo de la Tierra, donde los movimientos del magma sacuden las placas de la corteza terrestre, haciéndolas rozar unas contra otras. Estos movimientos pueden provocar una elevación del fondo marino, cuando una parte de la corteza es empujada hacia arriba, o un hundimiento del mismo, cuando una placa continental sucumbe bajo la presión de otra.

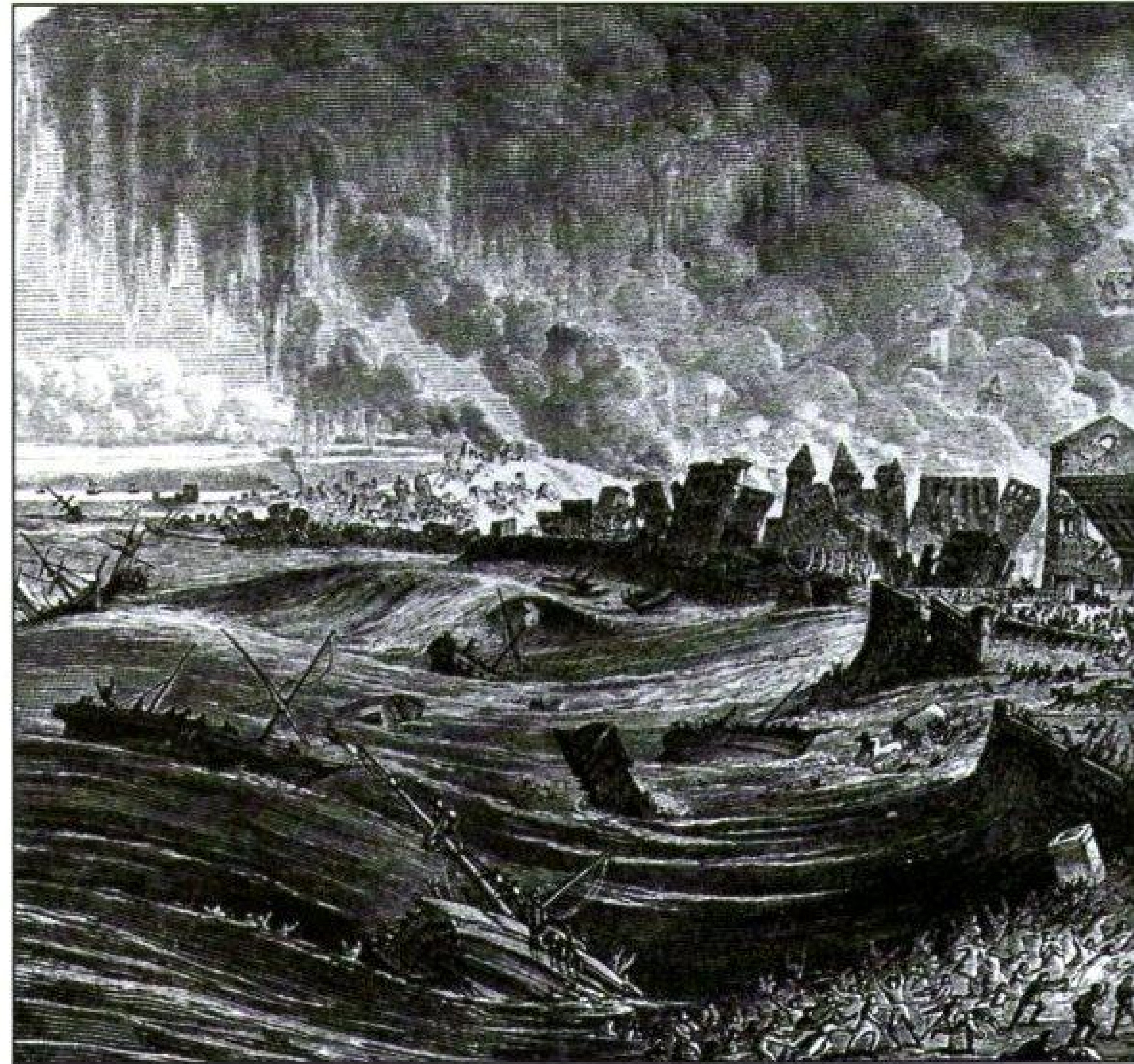
El fondo del mar actúa como la piel de un tambor cuando la golpea una baqueta. La vibración de la piel provoca reverberaciones en el aire, que nosotros captamos en forma de sonido. Del mismo modo, el movimiento del fondo marino provoca vibraciones en el agua que tiene encima. El resultado es un tsunami y un temblor de tierra, ambos provocados por el mismo movimiento de la corteza.

El terremoto gasta su fuerza cerca de su lugar de origen, pero el tsunami puede recorrer miles de kilómetros a través del mar. llegando sin previo aviso a alguna costa lejana. Las islas Hawai, que se encuentran en el centro mismo del «Cinturón de Fuego» del Pacífico, son atacadas por tsunamis desde todos los puntos cardinales.

Pero no todos los tsunamis producen efectos a tan largas distancias. Muchos temblores en zonas costeras van seguidos, a los pocos minutos, por un tsunami devastador, originado por el mismo movimiento del fondo marino. Tras el terremoto de Viernes Santo de 1964 en Alaska, se produjo un tsunami que cubrió por completo edificios de tres pisos.

En Seward, el temblor rompió las tuberías de los tanques de petróleo del puerto, y el petróleo se inflamó, provocando explosiones que esparcieron petróleo ardiente sobre el agua. La siguiente ola trajo consigo el petróleo en llamas, «como una gigantesca marea de fuego penetrando en tierra firme».

Las olas posteriores extendieron la destrucción por todas partes. Los raíles del ferrocarril se pusieron al rojo, hasta que cayó sobre ellos otra ola; el súbito enfriamiento los hizo «silbar y retorcerse como serpientes alzándose del suelo».

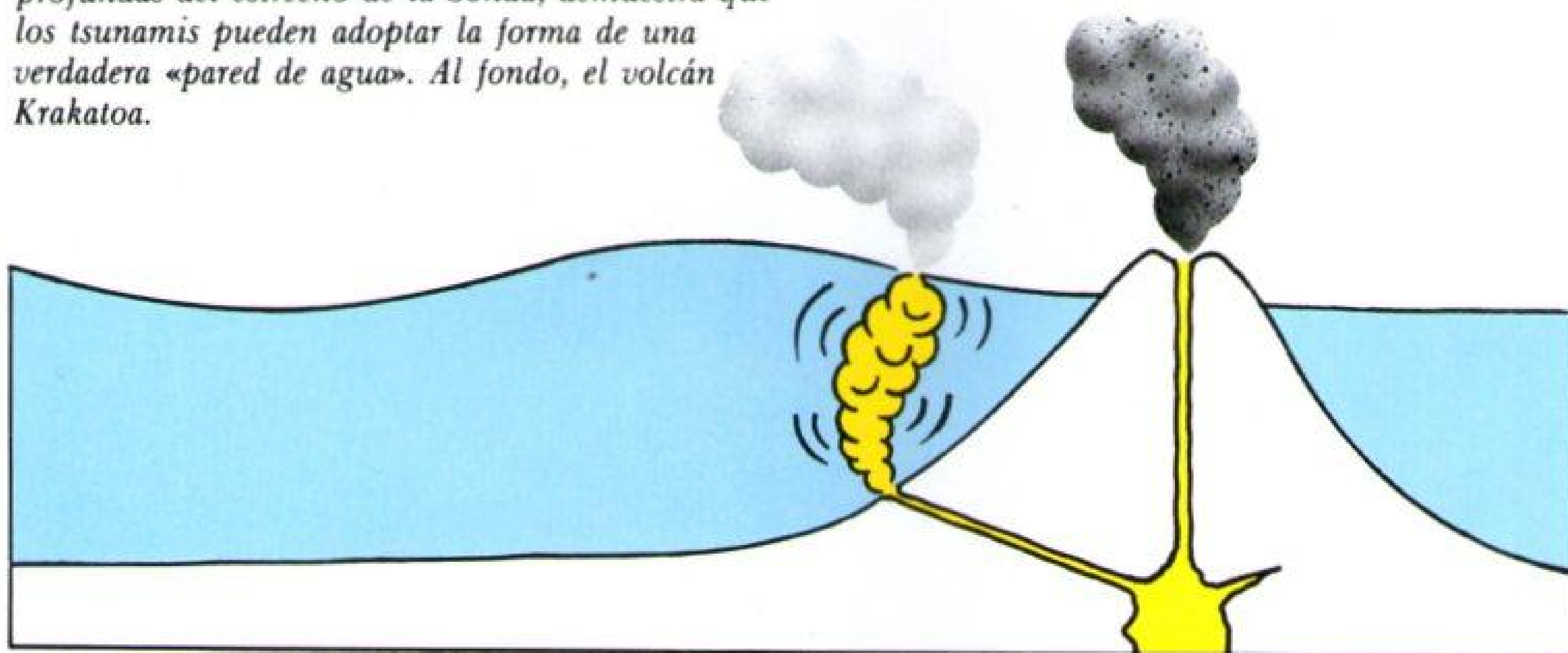


Lisboa, capital de Portugal, quedó arrasada por una doble catástrofe el 1 de noviembre de 1755. Primero, un terremoto submarino sacudió la ciudad; y cuando la población aterrada salió corriendo a las calles, se vio atacada por tres gigantescos tsunamis de 15 metros de altura, que arrancaron los barcos de sus amarras y al retirarse arrastraron consigo gran número de víctimas. A continuación se desató un incendio. En total, perdieron la vida más de 60.000 personas.



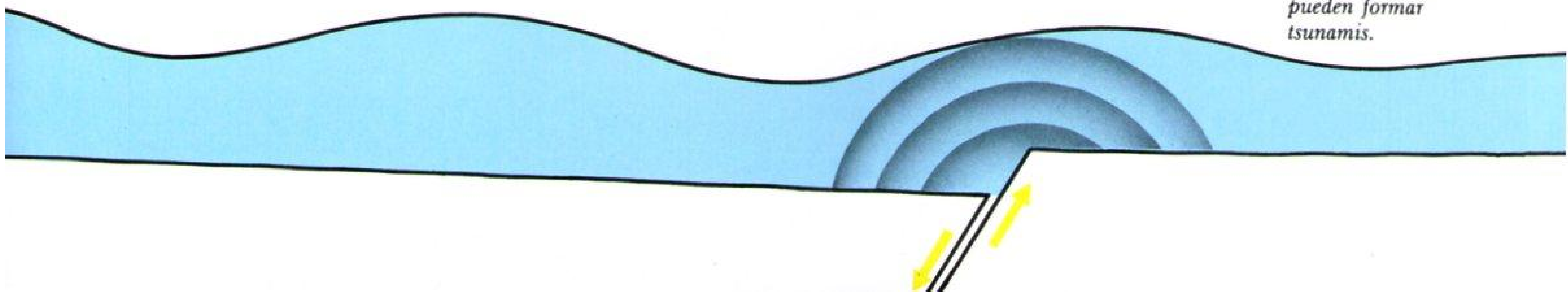
Esta ola gigante, formada en las aguas poco profundas del estrecho de la Sonda, demuestra que los tsunamis pueden adoptar la forma de una verdadera «pared de agua». Al fondo, el volcán Krakatoa.





A la izquierda, *una erupción volcánica bajo el mar desplaza el agua que tiene encima, provocando una sucesión de grandes olas.*

Los terremotos producidos en el fondo del mar (abajo) *tienen un efecto similar. El movimiento del fondo provoca un levantamiento del agua.*
Las olas resultantes son inofensivas, a menos que lleguen a aguas costeras poco profundas, donde pueden formar tsunamis.



Montañas y cañones submarinos

Los seres humanos somos criaturas terrestres, y los procesos que tienen lugar por encima del nivel del mar tienden a interesarnos más que los que permanecen ocultos bajo las aguas. Nos sentimos inmediatamente fascinados al enterarnos de que, debido a la combinación de movimientos y fuerzas conocida como tectónica de placas, Europa y Norteamérica se separan a razón de 2 cm por año, la velocidad con la que crecen las uñas, según lo ha expresado un científico.

Pero nos resulta mucho más difícil asimilar el concepto de que las tremendas fuerzas capaces de desplazar continentes sobre la faz de la Tierra se generan bajo los grandes océanos, invisibles y sin hacerse notar casi nunca.

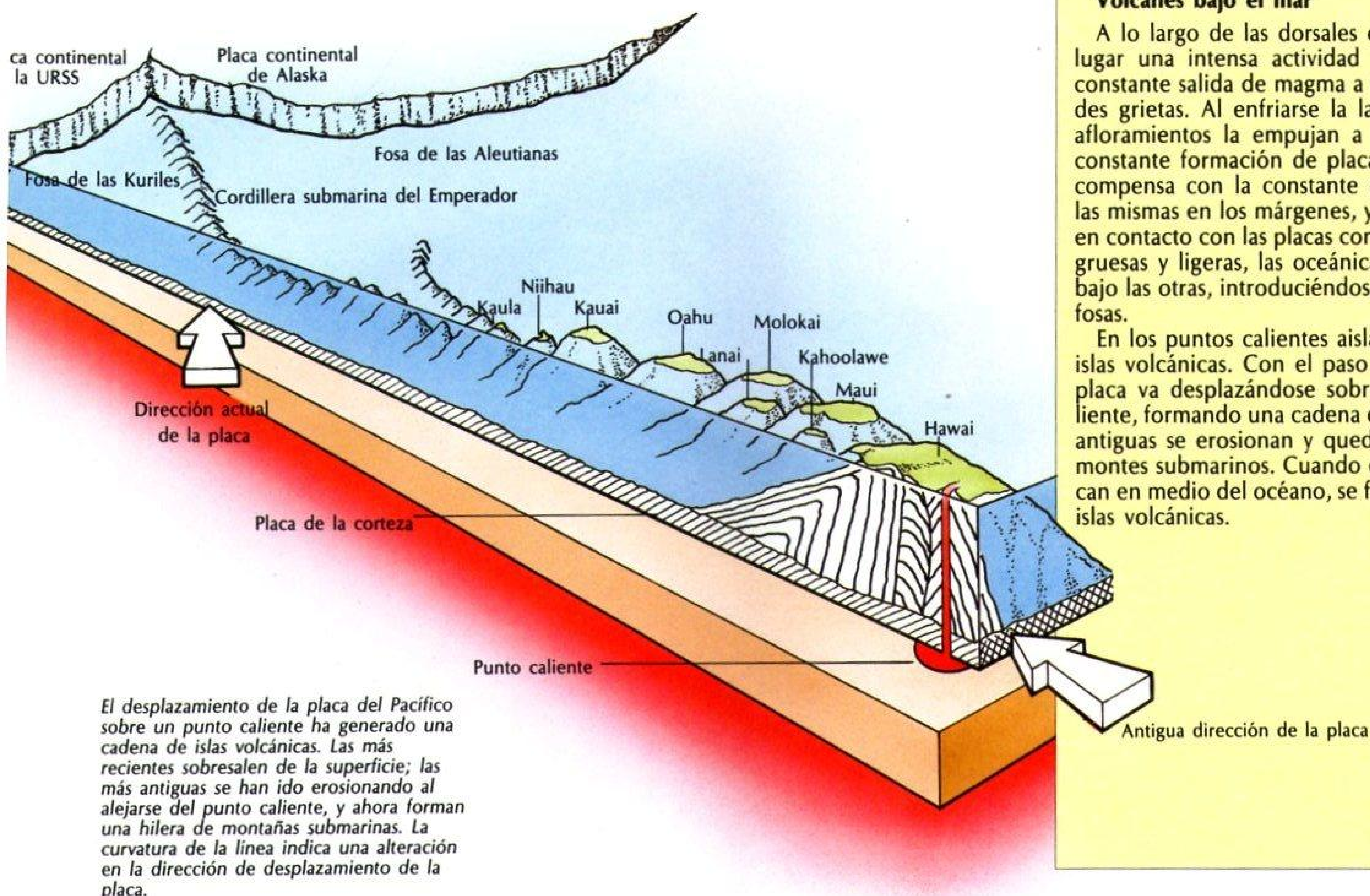
Cuando miramos la superficie del mar, todo es movimiento. Olas, corrientes, marejadas, mareas y espuma se combinan para dar en todo momento la impresión de una incesante actividad del agua. Y hasta hace unos treinta años se creía que la situación en el fondo del mar era completamente opuesta a la de las aguas situadas encima. Creíamos que el lecho de los océanos era una antigua y sólida base sobre la que se depositaba una interminable lluvia de sedimentos. Pero la ciencia de la tectónica de placas ha revelado que la realidad no podría ser más distinta. El fondo de los océanos está formado por rocas jóvenes, ninguna de las cuales tiene más de doscientos millones de años de edad. Y además, hay que tener en cuenta que se encuentra en constante movimiento.

La mayoría de los geólogos opina que el movimiento del fondo oceánico proporciona la principal fuerza motriz de todas las demás sacudidas de la corteza que generan las complicadas pautas de la deriva continental o tectónica de placas. La capa de roca afectada es la llamada «litosfera», un cascarón rígido de unos 75 km de espesor, formado por la corteza misma y la capa externa del manto, situada debajo. En el fondo de las cuencas oceánicas, la corteza se



Los volcanes de Hawai, alimentados por un «punto caliente» que actúa como un surtidor de magma, arrojan un flujo casi ininterrumpido de lava ardiente, que se enfría al contacto con el agua del mar, levantando enormes nubes de vapor. Este incesante proceso de formación de islas nos proporciona una sobrecogedora imagen del pasado de nuestro mundo: de este mismo modo se formó la primera tierra firme.





El desplazamiento de la placa del Pacífico sobre un punto caliente ha generado una cadena de islas volcánicas. Las más recientes sobresalen de la superficie; las más antiguas se han ido erosionando al alejarse del punto caliente, y ahora forman una hilera de montañas submarinas. La curvatura de la línea indica una alteración en la dirección de desplazamiento de la placa.

Volcanes bajo el mar

A lo largo de las dorsales oceánicas tiene lugar una intensa actividad volcánica, con constante salida de magma a través de grandes grietas. Al enfriarse la lava, los nuevos afloramientos la empujan a los lados. Esta constante formación de placas oceánicas se compensa con la constante destrucción de las mismas en los márgenes, ya que al entrar en contacto con las placas continentales, más gruesas y ligeras, las oceánicas desaparecen bajo las otras, introduciéndose en profundas fosas.

En los puntos calientes aislados se forman islas volcánicas. Con el paso del tiempo, la placa va desplazándose sobre el punto caliente, formando una cadena de islas. Las más antiguas se erosionan y quedan reducidas a montes submarinos. Cuando dos placas chocan en medio del océano, se forman arcos de islas volcánicas.

levanta 3 km, formando una serie de cordilleras submarinas casi completamente desconocidas, que dan varias veces la vuelta al planeta. Estas cordilleras, denominadas crestas o dorsales, son zonas cruciales en el sistema de placas tectónicas.

Estas crestas montañosas tienden a ocupar una posición central en el fondo de los océanos. En el Atlántico Norte forman la dorsal de Reykjanes; en el Atlántico Sur, la dorsal Atlántica central; y en el Pacífico, la dorsal del Pacífico oriental. A lo largo de estas delgadas franjas de la corteza terrestre va aflorando roca fundida del manto, que al enfriarse forma nueva litosfera. Por esta razón, a estas líneas de actividad se las conoce como márgenes constructivos de las placas.

Esta actividad constructiva va levantando las cadenas de montañas submarinas. El magma fundido no cesa de aflorar, solidificándose y añadiendo material a las montañas. Después de enfriarse y solidificarse, el magma se desplaza hacia los lados, simétricamente, formando los flancos de la cresta. Tras él surge más magma, que empuja al anterior más hacia los lados, creando nuevo fondo marino. Este proceso es el causante de que Nueva York y Londres se vayan separando cada vez más.

La lenta expansión permite que las rocas de la zona marginal se superpongan, formando las crestas montañosas. Si la expansión es más rápida, las elevaciones marginales serán más bajas, como ocurre en el Pacífico oriental.

Casi toda esta misteriosa y titánica actividad pasa inadvertida a los ojos humanos. Sin embargo, en algunos lugares las dorsales oceánicas emergen del mar, en forma de islas volcánicas. Dos buenos ejemplos son las islas de Tristán da Cunha e Islandia, ambas situadas en la zona constructiva del Atlántico, y todavía en proceso de crecimiento.

Islandia es una isla joven; se formó a partir del magma enfriado en una parte emergente de la dorsal de Reykjanes, de unos 322 km de longitud. Su paisaje está dividido en dos por una línea oblicua de volcanes activos, que va de suroeste a noreste y señala los márgenes de las placas. A cada lado de esta línea hay una franja de terreno formado por rocas del cuaternario reciente. Más allá, en los márgenes de la isla, las rocas son más antiguas, del terciario. Podemos suponer que en el fondo del mar existe una congruencia similar entre la distancia a la dorsal y la antigüedad de las rocas: las más cercanas son las más recientes, y las más alejadas, las más antiguas.

Esto se ha confirmado mediante estudios del paleomagnetismo, o magnetismo residual en las rocas formadas en el pasado. Al enfriarse el magma fundido, su estructura interior mantiene la orientación causada por los polos magnéticos de la Tierra en el momento de enfriarse la roca. Cuando los polos magnéticos intercambian posiciones, cada varios cientos de miles de años, cambia también la orientación «impresa» en las rocas que se enfrían entonces.

Cuando se consiguió trazar un mapa de estos cambios en muestras de rocas extraídas del fondo de los océanos, quedó claro que

Fondo del océano
Dorsal oceánica
Continente
Arco de islas
Cadena montañosa submarina
Isla volcánica
Montaña submarina
Plataforma continental
Fosa

dichos cambios magnéticos habían quedado reflejados a lo largo de cientos de kilómetros, a ambos lados de las dorsales oceánicas.

Mediante modernos instrumentos de gran sensibilidad, remolcados desde barcos, se ha logrado elaborar un mapa de las inversiones magnéticas en las rocas del fondo marino. Las pautas ocultas descubiertas en las rocas sólo pueden explicarse si las dorsales llevan muchos millones de años actuando como centros de formación y expansión rocosa.

Frente a la costa sur de Islandia podemos encontrar una prueba palpable del potencial constructivo del magma: una nueva isla volcánica, Surtsey, que surgió del mar en 1963, demostrando de manera espectacular cómo el magma que fluye en los márgenes constructivos puede crear montañas submarinas. Un proceso similar de orogenia volcánica tiene lugar sobre los llamados «puntos calientes», bajo la corteza previamente solidificada del fondo marino. Uno de los mejores ejemplos es el punto caliente situado bajo las islas Hawai.



Tan asombrosa como las propias montañas submarinas resulta la habilidad de los científicos para reunir información acerca de ellas. El sonógrafo (izquierda) *es una imagen creada por un sonar de largo alcance: en él vemos un volcán submarino de la cresta del Pacífico Oriental, con un cráter de dos kilómetros de anchura y un posible foso. Este volcán, situado a 4.000 metros de profundidad, tiene una altura de 1.500 metros y su base mide 10 km de diámetro.*



Las grandes profundidades del océano van revelando poco a poco sus secretos a los exploradores modernos. A mediados de los años setenta, la construcción de nuevos sumergibles de investigación, como el Alvin, *permitió alcanzar profundidades de 3.650 metros. El* Alvin, *abarrotado de instrumentos, cámaras y sensores, está tripulado por un piloto y dos científicos, y dispone de brazos mecánicos para manejar el equipo en travesías de hasta 9 horas.*

Parece que, aunque el punto propiamente dicho ocupa una posición fija, su posición relativa con respecto a la corteza terrestre ha ido cambiando durante decenas de millones de años, porque la enorme placa del Pacífico se deslizaba sobre él, en dirección noroeste (más o menos, hacia Japón). Así se fue formando la cadena de islas que se extiende desde Hawai hasta Midway y Kure, a lo largo de 2.250 km.

Más al noroeste, y continuando más o menos la línea anterior, se encuentra la cordillera submarina del Emperador, ninguna de cuyas montañas emerge de la superficie. El estudio de las edades de las rocas que forman todas estas islas ha revelado una clara secuencia. Hawai es aún joven: ninguna de sus partes llega a los 700.000 años de edad, y algunas regiones aún se están formando por acción volcánica. Si seguimos hacia el norte y el oeste, las rocas van siendo cada vez más antiguas, hasta llegar a la montaña submarina de Meiji, cuyas rocas tienen 70 millones de años de antigüedad.

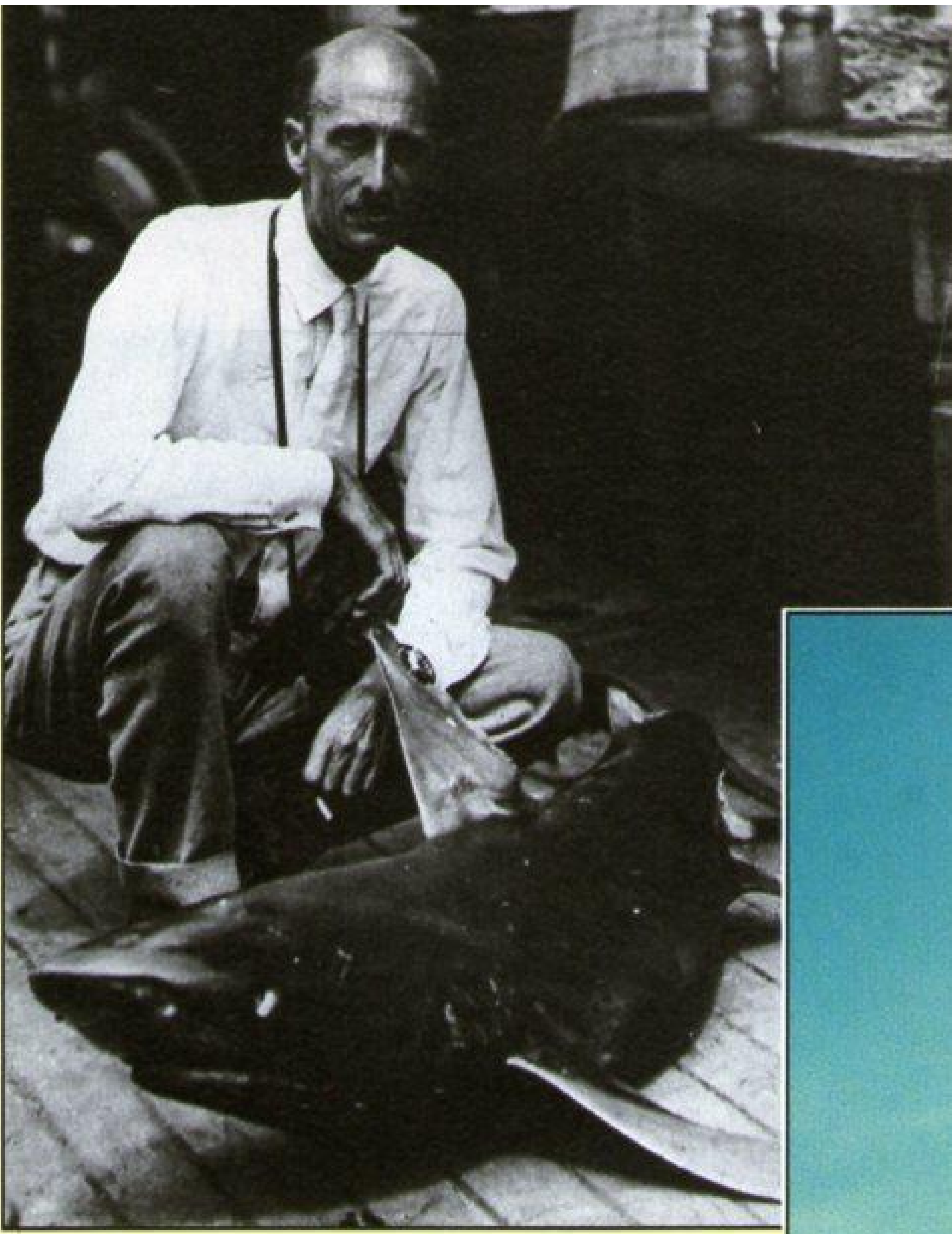
¿Qué ha provocado la formación de esta misteriosa cadena de islas, y por qué sus edades muestran una gradación tan clara? La respuesta está en el punto caliente. La placa del Pacífico se ha desplazado por encima de él a una velocidad bastante constante, de 8 a 10 cm por año. Aproximadamente cada millón de años, se acumula sobre el punto caliente suficiente lava para formar una nueva isla volcánica, como está sucediendo ahora mismo en Hawai.

Pero al irse desplazando la placa, se lleva consigo la isla, hasta acabar por desconectarla de la fuente de lava fundida. Entonces la isla deja de crecer, y las fuerzas del viento, la lluvia y el oleaje comienzan a erosionarla. Según avanza hacia el noroeste, la isla va perdiendo altura, hasta que, al cabo de unos treinta millones de años, queda completamente cubierta por las aguas, formando una montaña submarina.

Esta presunta interacción del punto caliente, el movimiento de la placa y la erosión podría explicar tanto la sucesión lineal de las islas como sus progresivas edades. Si la hipótesis es correcta, podemos suponer que tarde o temprano se formará un «hijo de Hawai». Y efectivamente, tal como predice la teoría, al sureste de la isla existe ya una colina submarina de 300 m de altura. El punto caliente ha empezado a crear otra isla.

La intensa actividad volcánica descubierta recientemente en los márgenes constructivos de las placas ha sido objeto de frenéticas investigaciones geofísicas. Los estudios más espectaculares han sido los realizados con sumergibles de máxima profundidad y alta tecnología. Estas investigaciones han demostrado que en las rocas de las dorsales existen fuertes flujos de calor. Se han llevado a cabo concienzudas descripciones de las diferentes formas que adopta la lava al enfriarse con rapidez cuando la roca fundida emerge en el fondo marino. Una de las más curiosas es la lava almohadillada: bloques redondeados que se enfrían por separado y luego quedan amontonados.

Sin embargo, el descubrimiento más interesante realizado hasta ahora por los sumergibles ha sido el de las chimeneas sub-



Willian Beebe (1877-1952), explorador, ornitólogo y escritor, fue uno de los primeros en descender a las profundidades marinas.

Exploradores de las profundidades

La exploración submarina nació en 1934, cuando los norteamericanos William Beebe y Otis Barton descendieron en un batiscafo de acero suspendido de un cable hasta una profundidad de 923 m. Veinte años después, el belga Auguste Piccard y su hijo Jacques alcanzaron una profundidad de 3.167 m frente a la costa italiana, en un batiscafo autónomo. En 1960, Jacques descendió a la profundidad máxima del océano, 10.912 m, en la fosa de las Marianas.

La cabina de plástico del Sea Link *proporciona una magnífica visión del entorno. Una cámara de presión permite a los tripulantes trabajar desde el sumergible.*

marinas. En zonas del fondo del mar con gran actividad volcánica se han encontrado numerosos chorros de agua caliente que surgen de las rocas entre el agua fría de las profundidades. Parece que se deben a la penetración de agua del mar en las grietas de la roca caliente, donde se calienta a temperaturas muy altas, para ser posteriormente expulsada por las chimeneas.

Al pasar a través de las rocas volcánicas calientes, el agua arrastra grandes concentraciones de minerales disueltos o en suspensión, sobre todo sulfuros de hierro, zinc, manganeso y cobre. Estas sustancias convierten el agua en una suspensión muy turbia, que al salir por las chimeneas parece una columna de «humo» blanco o negro. A veces, los minerales que salen con el chorro se van depositando en torno al agujero, formando columnas huecas que son verdaderos tubos de chimenea. Estas sorprendentes estructuras tendrían interés aunque sólo se tratara de fenómenos geofísicos, pero además su presencia ha dado lugar a la formación de comunidades de organismos subma-



rinos, que figuran entre las menos ortodoxas del planeta.

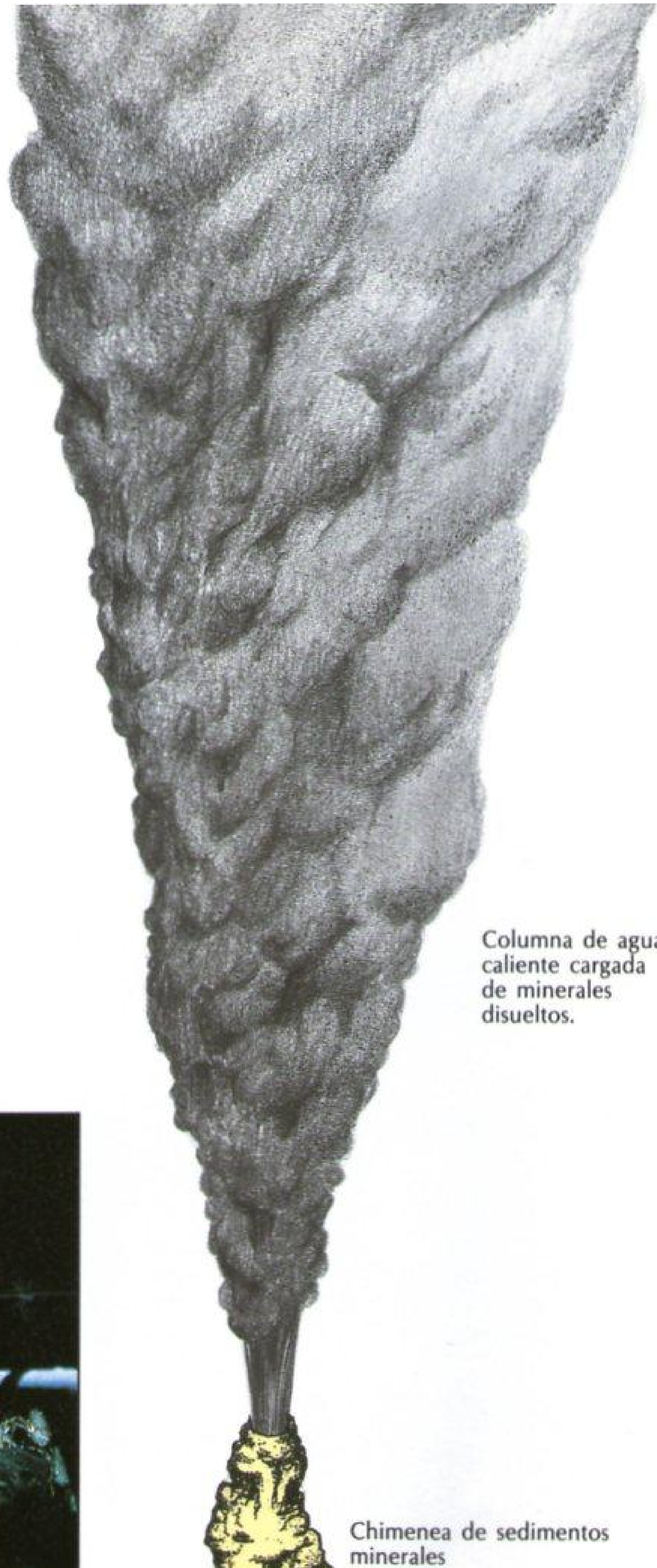
En las demás partes del globo, las comunidades de organismos dependen, en último término, de la energía del sol. Tanto en tierra firme como en las aguas dulces o saladas, son las plantas verdes las que captan la energía solar y, por medio de la fotosíntesis, elaboran las materias primas con las que se mantienen todos los demás organismos del sistema. Los animales herbívoros se comen las plantas y son, a su vez, devorados por los carnívoros.

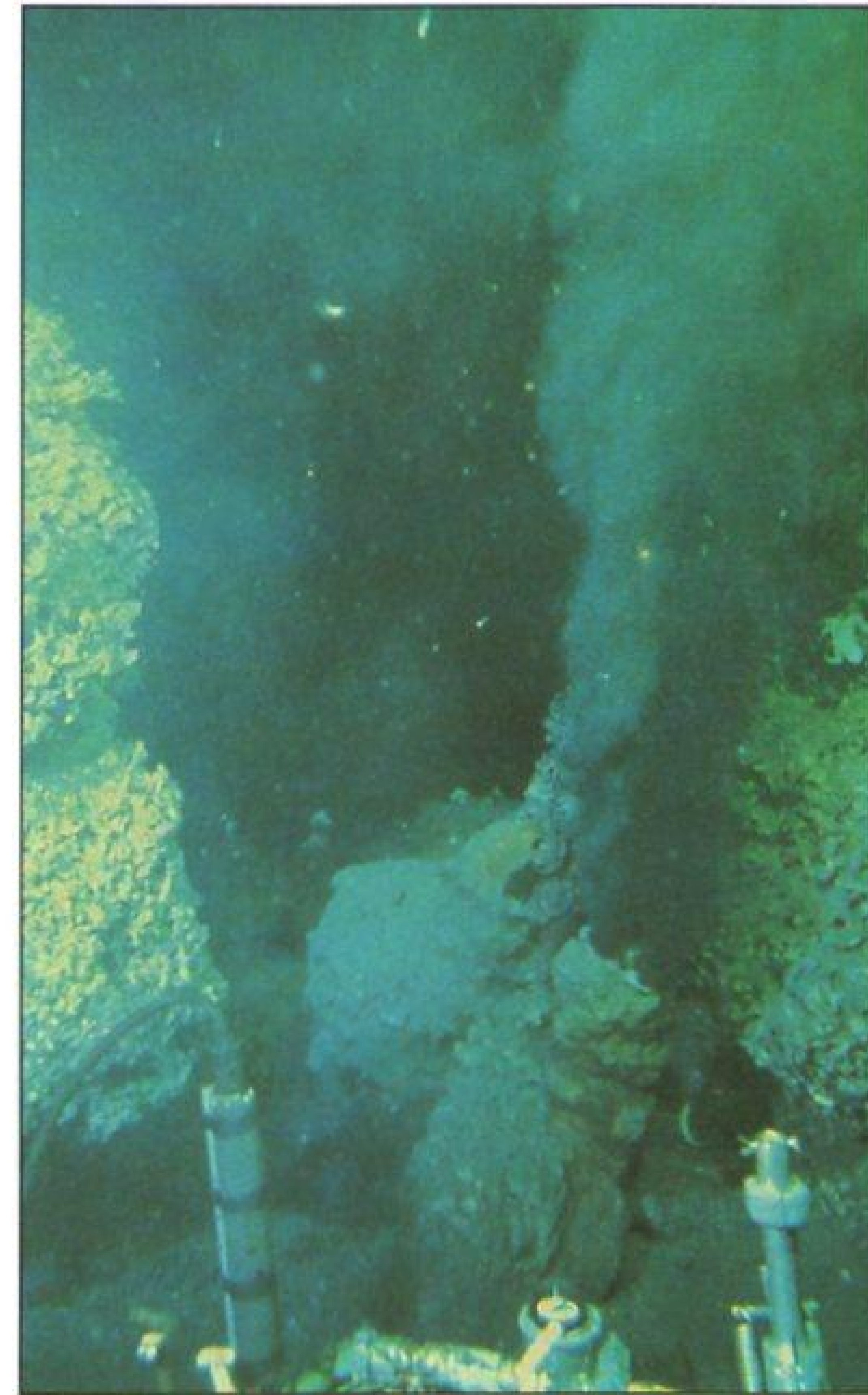
Pero las comunidades de las chimeneas son muy diferentes. En la absoluta oscuridad de las profundidades marinas, las elevadas concentraciones de sulfuros en los chorros de agua caliente parecen ser la única fuente alternativa de energía, que puede ser aprovechada por algunas bacterias quimiótrofas, capaces de descomponer el sulfuro de hidrógeno para obtener energía. Estas bacterias parecen constituir la base de la subsistencia de la comunidad animal de las chimeneas. En algunos casos, sirven de alimento a diversos moluscos y crustáceos filtradores, que sólo existen en las chimeneas. En otras ocasiones, las bacterias han establecido una relación simbiótica con los animales, viviendo en sus tejidos y proporcionándoles a cambio los nutrientes que necesitan.

Al parecer, esto es lo que sucede con los pogonóforos, gigantescos gusanos tubícolas de color rojo brillante y unos dos metros de longitud, que carecen de tubo digestivo, a pesar de lo cual forman grandes colonias cerca de las chimeneas. El secreto de su vitalidad parece estar en las bacterias que viven en sus cuerpos. A miles de metros bajo la superficie, en la más absoluta tiniebla, los pogonóforos subsisten gracias al agua sulfurosa formada por infiltración en la roca volcánica. Aquí tenemos uno de los más extraños e increíbles misterios de la Tierra.

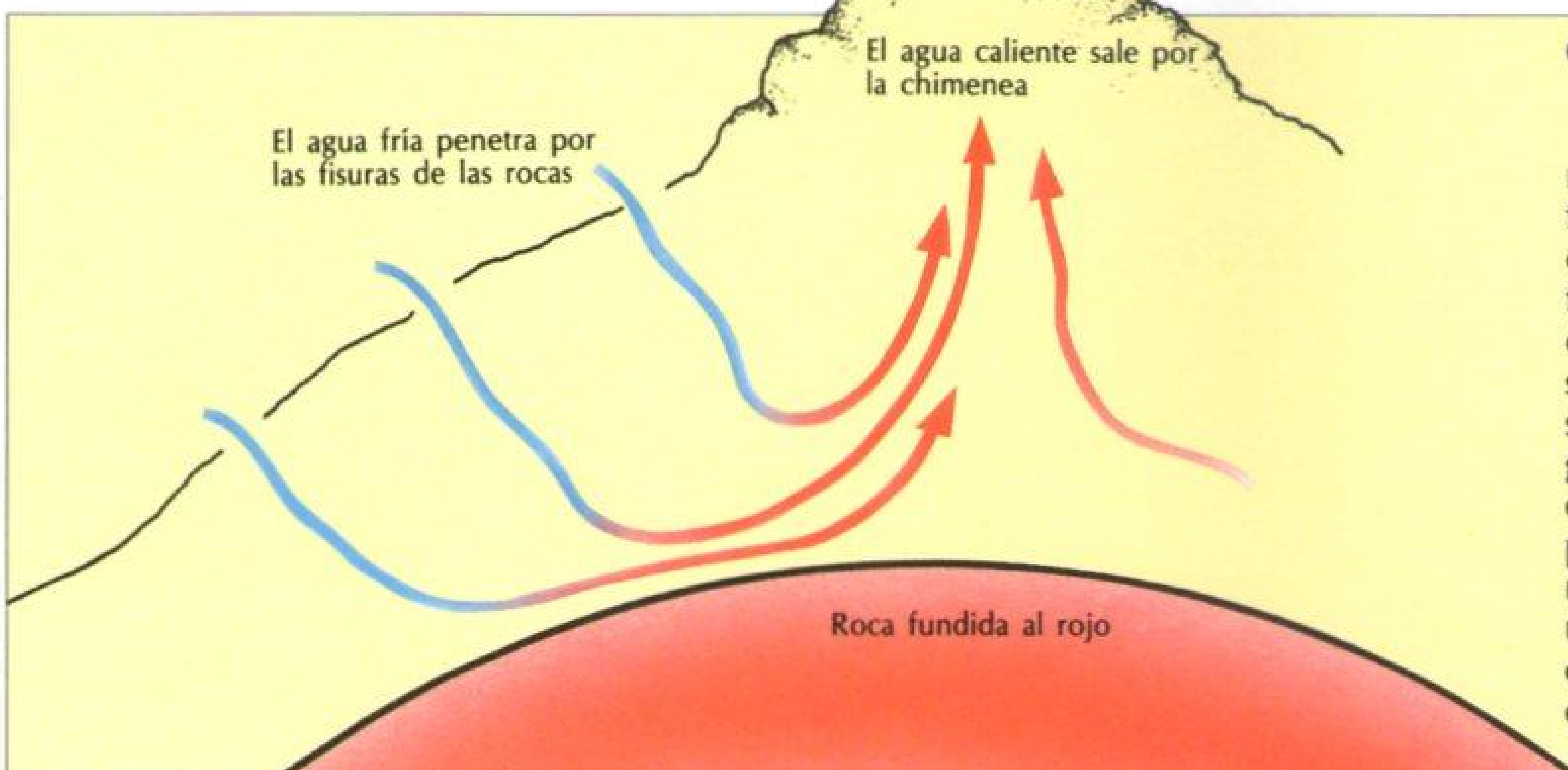
En 1979, los científicos que exploraban las oscuras y normalmente despobladas profundidades de la región hidrotérmica de las Galápagos quedaron sorprendidos al descubrir grandes colonias de gusanos tubícolas gigantes en las proximidades de las chimeneas submarinas. El misterio aumentó al descubrirse que los gusanos carecían de boca, intestino y ano. En lugar de alimentarse de manera convencional, han establecido una relación simbiótica con bacterias que viven en las cavidades de su cuerpo y que transforman los sulfuros del agua en nutrientes. De manera similar subsisten algunos cangrejos y moluscos (abajo).







En las aguas heladas que rodean la dorsal del Pacífico oriental existen chimeneas que arrojan columnas oscuras de agua cargada de minerales, a temperaturas que pueden superar los 350 °C. Debido a la gran profundidad —unos 2.600 metros—, la presión es tan alta que el agua no hierve.



Chimeneas submarinas

Este esquema de la formación de una chimenea muestra cómo el agua fría de las profundidades (con una temperatura aproximada de 2 ºC) se infiltra en la roca porosa del fondo del mar, fluye a través de las rocas, donde se calienta por efecto del magma que surge por la dorsal en expansión, y por fin sale por una chimenea, caliente y turbia, cargada de minerales —en especial, sulfuros— que ha ido disolviendo de las rocas y que precipitan para formar las paredes de la chimenea. Estas condiciones han dado lugar a una extraordinaria comunidad de organismos que vive en torno a las chimeneas de agua caliente.

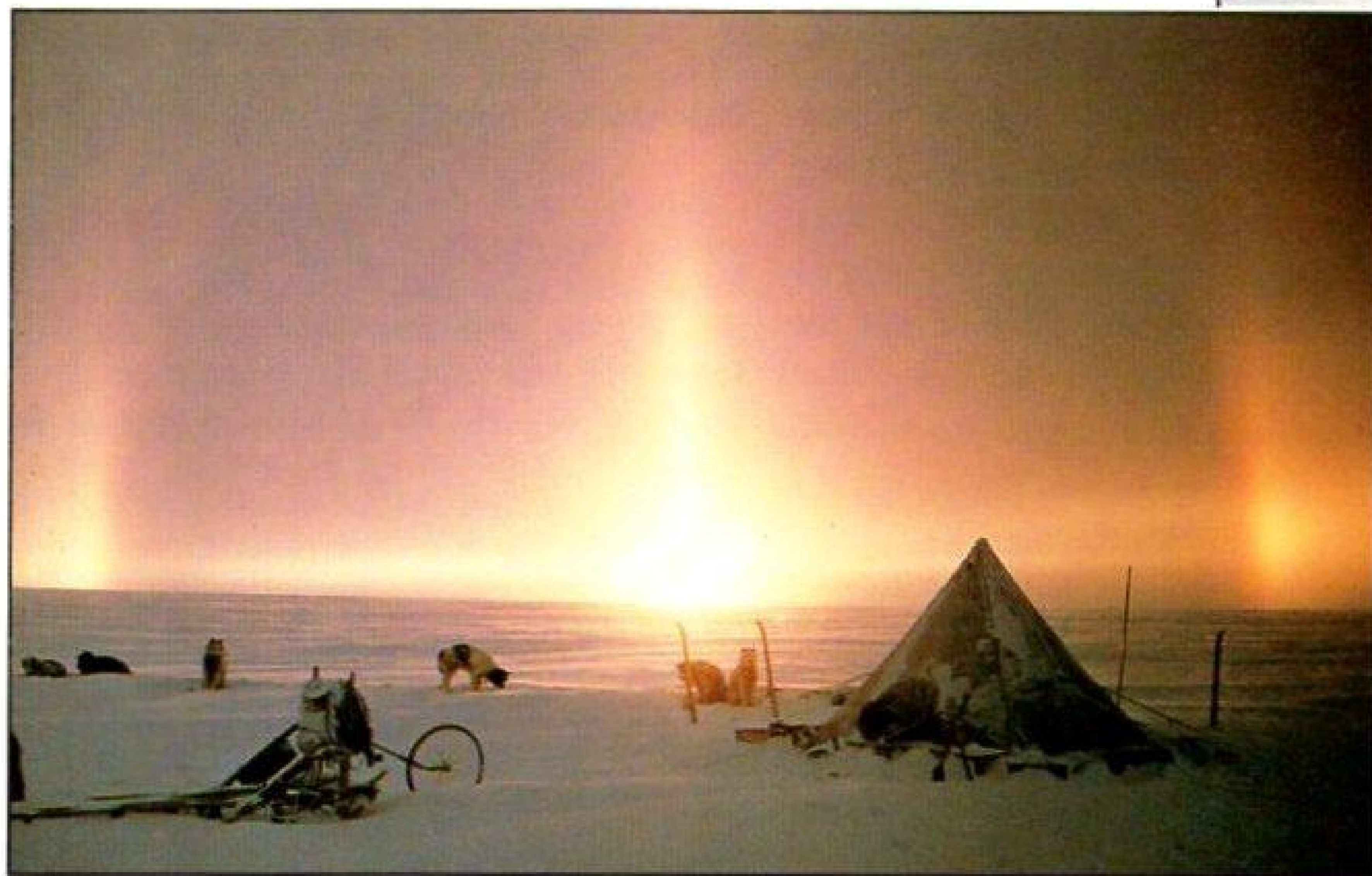
El continente helado

La Antártida, el continente helado, está separada de Tierra del Fuego por un canal de aguas turbulentas cuya anchura no supera los 1.000 km. La punta sur de América es el lugar del mundo más cercano a la Antártida. Por este canal se aventuraron los primeros barcos exploradores —voluntariamente o arrastrados por los vientos— que se toparon con la gran masa continental que rodea al Polo Sur.

Estos primeros exploradores eran balleneros y cazadores de focas, aventureros curtidos en busca de nuevos territorios de caza, tras haber esquilmado los mares e islas situados más al norte. No tenían ni idea de que al sur les aguardaba un nuevo continente. Y perdidos en el paisaje cambiante de los bancos de hielo, con niebla y ventiscas constantes, sin mapas ni cartas de navegación, aquellos hombres mal podían describir la misteriosa tierra que divisaban a lo lejos.

Mucho tiempo antes, con su pasión por la lógica y la simetría, los antiguos griegos habían llegado a la conclusión de que debía existir un enorme continente austral que equilibrara la masa de Eurasia. Esta hipótesis apenas encontró oposición hasta 1578, cuando Francis Drake, empujado hasta muy al sur por violentas tormentas, no encontró ni rastro de la mítica Terra Australis.

El misterioso y casi increíble monte Erebo, que se alza a 3.794 metros de altura en medio de una desolación helada, arroja una columna de humo. En 1841, cuando el explorador sir James Clark Ross divisó por primera vez el Erebo —uno de los cuatro volcanes de la isla de Ross—, el monte escupía humo y llamas a cientos de metros de altura. Su última erupción tuvo lugar en 1984-1985, acompañada por violentas explosiones de gas.



En la atmósfera seca y despejada de la Antártida se ven con frecuencia extraños y hermosos fenómenos ópticos, como el halo solar o parhelio, producido por los rayos del sol al atravesar cristales de hielo en el aire. La fotografía está tomada a las dos de la madrugada de una noche de verano.



Dos siglos más tarde, en 1778, el capitán Cook puso rumbo al sur y dedicó tres años a la infructuosa búsqueda del continente austral, cruzando tres veces el círculo polar antártico.

Al final, se vio obligado a reconocer que la Terra Australis no existía. Pero lo que había visto en los mares del sur le convenció de que allí tenía que existir algo, «una extensión de tierra cerca del polo, que es la fuente de todo el hielo que se encuentra esparcido por este enorme océano del sur». Hubo que esperar al siglo XX para comprobar hasta qué punto estaba acertado Cook en sus suposiciones. La Antártida resultó ser más grande que Australia y que Europa, más grande que los Estados Unidos y México juntos.

Todo el territorio de la Antártida está cubierto por una capa de hielo que tiene un espesor medio de 2.400 m, aunque en un valle particularmente profundo llega casi a los 4.800 m. La presión en la base del hielo es inmensa. Las mediciones científicas y las observaciones realizadas desde satélites han demostrado que el peso del hielo empuja la Antártida hacia abajo, dándole a nuestro planeta la forma achatada de una pera. Si este hielo se derritiera de pronto, el suelo de la Antártida se elevaría de golpe unos 600 m.

Todo este hielo ha ido cayendo en forma de nieve desde hace millones de años. Comprimida por las capas que se van acumu-



Un iceberg desprendido del banco de Ross flota a la deriva en alta mar. El suelo de la Antártida, aplastado por el enorme peso del hielo, se encuentra por debajo del nivel del mar, aunque la altitud media es superior a la de los demás continentes.

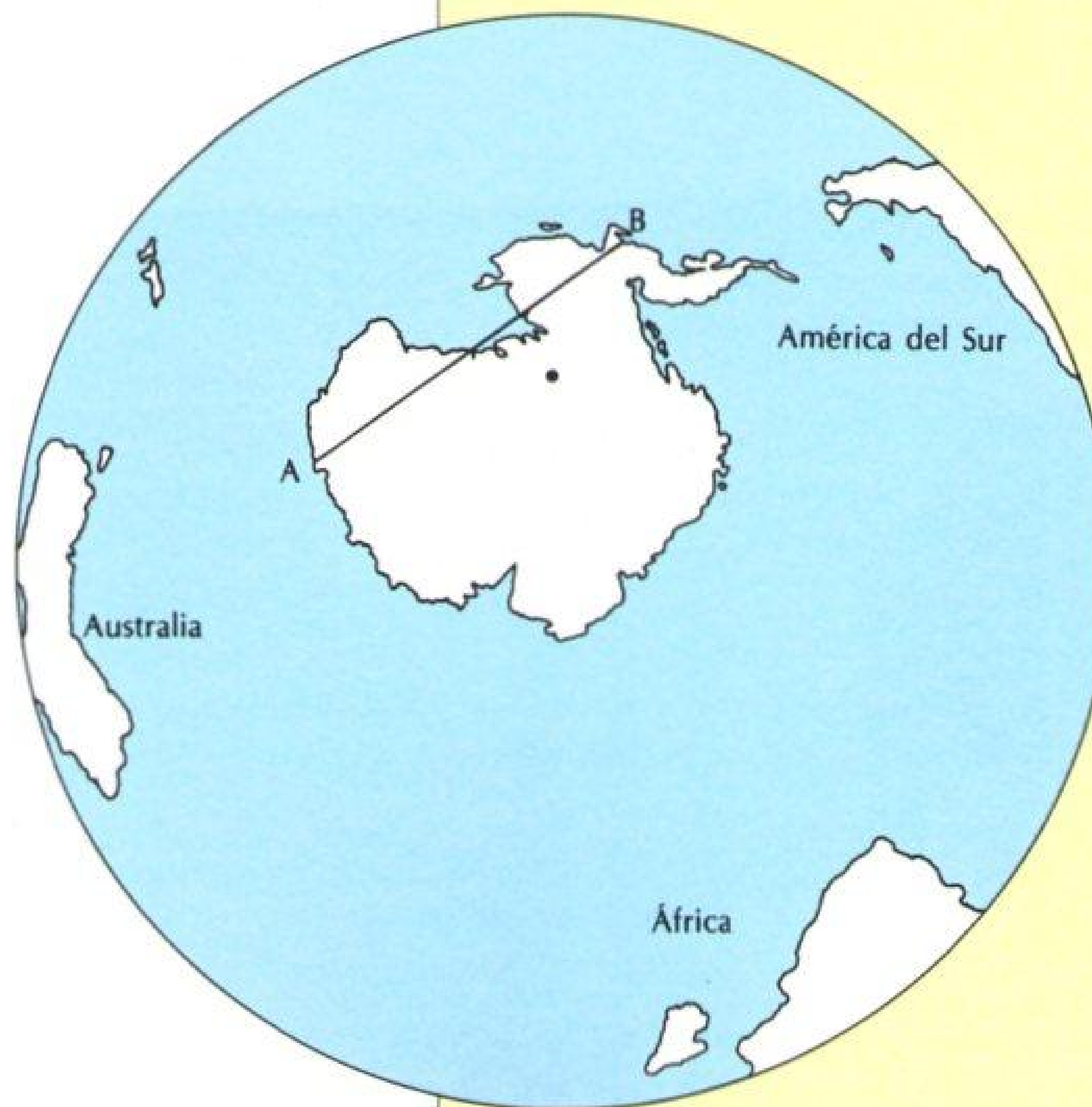
lando encima, la nieve pierde poco a poco sus burbujas de aire y se consolida. El hielo se va acumulando y su propio peso lo empuja desde las alturas centrales, formando glaciares. Algunos de ellos descargan su gélido contenido directamente en el mar, mientras que otros forman enormes bancos de hielo, de miles de kilómetros de anchura, que flotan sobre las aguas.

Los glaciares avanzan con extraordinaria lentitud, a veces menos de un metro por año, mientras el hielo de su interior se vuelve plástico bajo las tremendas presiones. A diferencia de los ríos, no disponen de una fuente constante de material en su nacimiento, ya que en la Antártida la nieve cae en la costa, y el interior del continente apenas recibe precipitaciones. Es más seco que el Sahara, y sólo la increíble lentitud de los glaciares mantiene la tierra cubierta de hielo. En este extraño rincón del mundo, el frío extremo parece haber congelado el tiempo mismo.

Además de ser el lugar más seco del mundo, la Antártida es el más ventoso, con ráfagas de hasta 320 km por hora. Cuando el viento arrastra nieve, se producen los cegadores «vientos blancos», que impiden la navegación, incluso a cortas distancias. Además, los vientos ejercen un extraño efecto sobre la nieve, esculpiendo su superficie con valles y montañas en miniatura.

No existe en la Tierra un lugar tan inhóspito para los seres vivos como el continente antártico. Aparte de algunas algas rojas, tan resistentes que pueden subsistir en la superficie del hielo y la nieve, la vida se encuentra confinada en unos pocos puntos que quedan libres del hielo durante el verano.

Estos oasis del desierto helado se encuentran a lo largo de la costa, sobre todo en el brazo rocoso conocido como península Antártica, que apunta hacia América del Sur. Están cubiertos de abundante vegetación, en



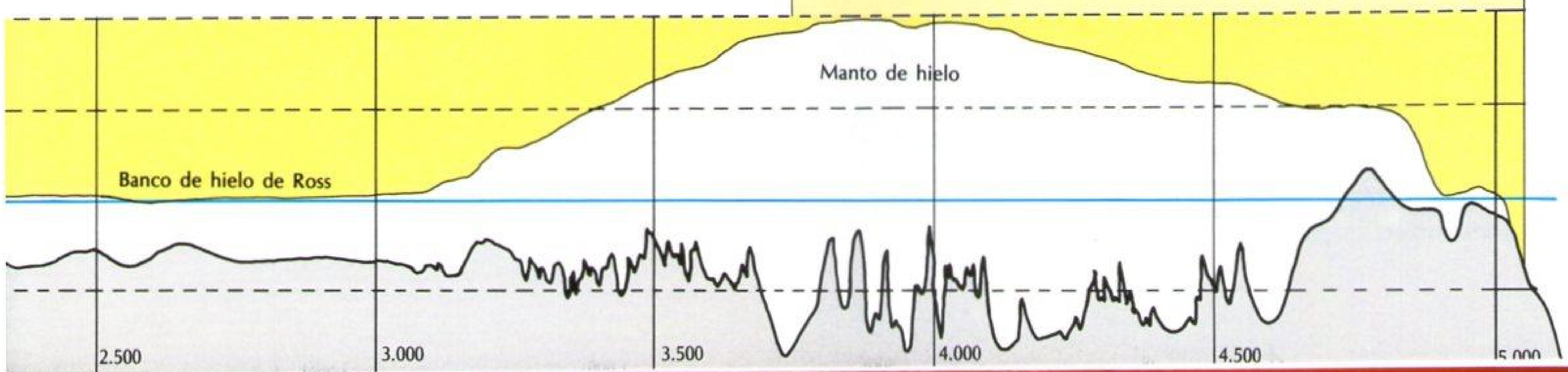
Hasta hace 150 millones de años, la Antártida estuvo unida a la India, África, Australia y América del Sur, formando el supercontinente de Gondwana. Al fragmentarse Gondwana, la deriva continental llevó a la Antártida hacia el sur, hasta que quedó establecida sobre el Polo Sur. El gráfico de abajo corresponde a la sección transversal por la línea A-B.

El pasado olvidado de la Antártida

En 1969 se descubrieron en lo alto de las montañas Transantárticas huesos fosilizados. No se trataba de fósiles de pingüinos, focas u otros animales polares, sino de *Lystrosaurus*, un animal a mitad de camino entre los reptiles y los mamíferos, que vivió hace doscientos veinte millones de años. El *Lystrosaurus* medía 50 cm de altura y debía llevar una vida semiacuática en charcas de agua templada. Estos fósiles junto con otros de helechos, cocodrilos, tortugas y árboles encontrados en la Antártida, indican que el continente helado tuvo en otros tiempos un clima subtropical y formaba parte de Gondwana, ya que son similares a los fósiles encontrados en los continentes meridionales. Cuando Gondwana se fragmentó, la Antártida se fue desplazando hacia el sur, se volvió más fría y, durante algún tiempo, disfrutó de un clima templado. Por último, se estableció sobre el Polo Sur y se empezó a formar el casquete de hielo. El casquete actuó como un gigantesco refrigerador, que enfrió el planeta, haciendo que las selvas tropicales africanas cedieran espacio a las praderas y, probablemente, proporcionando el estímulo necesario para que algunos prehomínidos abandonaran los árboles y evolucionaran en las llanuras, convirtiéndose en los antepasados del «hombre moderno».

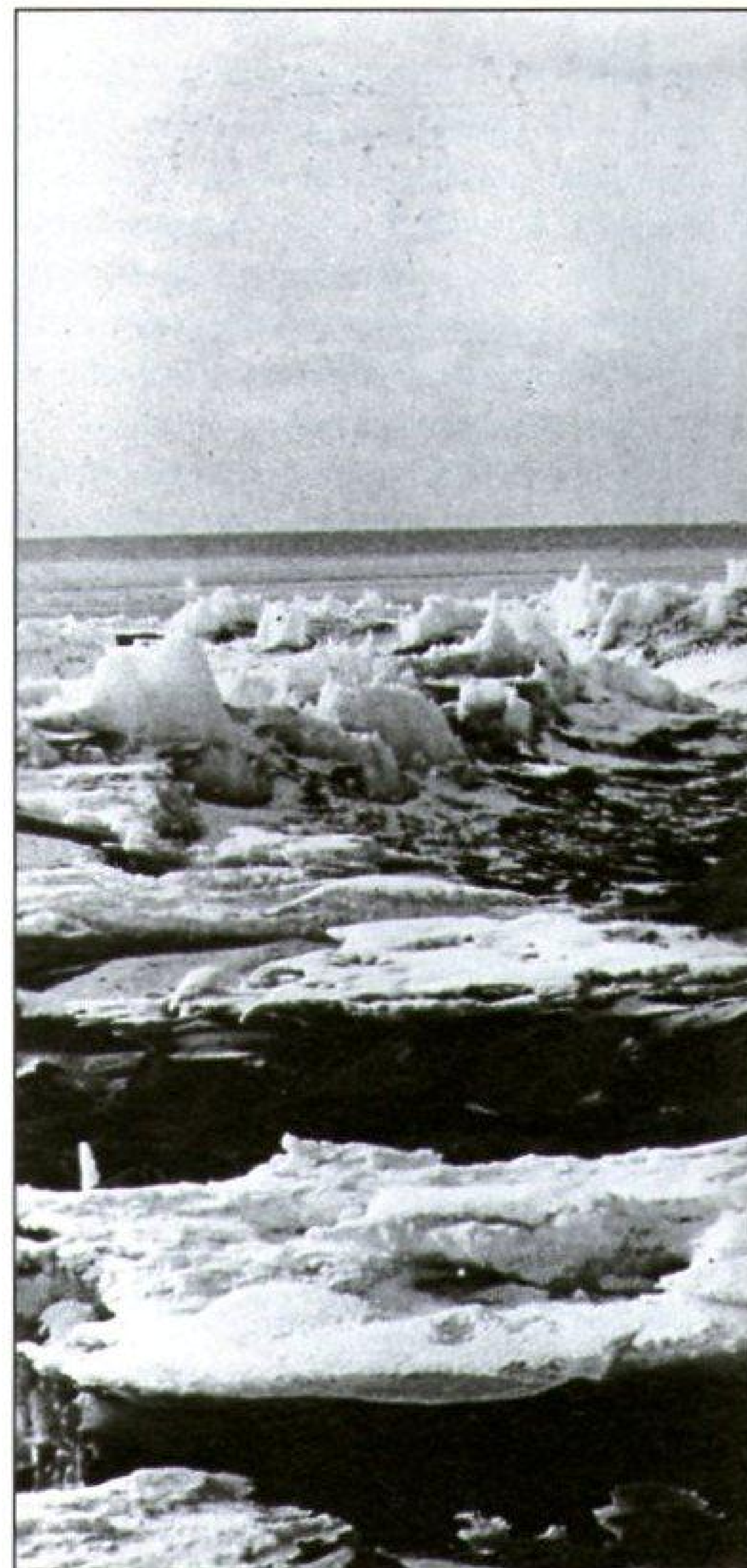


Reconstrucción artística del Lystrosaurus





Los balleneros noruegos fueron los primeros en desembarcar en la Antártida, en 1895. El continente helado despertó cada vez más interés, y en 1901 una expedición británica dirigida por el capitán Robert Scott (1868-1912) zarpó rumbo a la Antártida en el rompehielos Discovery (a la derecha). *Su viaje de exploración e investigación duró más de dos años.*
La segunda expedición de Scott tuvo lugar en 1910 y coincidió con la dirigida por el noruego Roald Amundsen (1872-1928), a la izquierda. *Se entabló entre ambas una carrera por llegar al Polo Sur. Amundsen logró llegar en un trineo de perros el 14 de diciembre de 1911. Scott llegó el 18 de enero de 1912. Derrotados en la carrera e inmovilizados por las ventiscas y las temperaturas inferiores a —40 °C, Scott y sus cuatro compañeros perecieron en el viaje de regreso a su base.*



la que predomina una gramínea, la *Deschampsia antarctica,* junto con densas masas de musgo que añaden un desacostumbrado toque de verdor al paisaje. En el resto de la Antártida no hay más que líquenes, organismos compuestos basados en la alianza permanente de un hongo y un alga. Sólo los líquenes consiguen sobrevivir en condiciones tan hostiles.

La vida animal es toda de tamaño minúsculo. Lombrices, ácaros e insectos primitivos son los principales habitantes del suelo y la vegetación. Algunos de ellos son visibles a simple vista; pero el más grande de todos, un insecto áptero llamado *Belgica antarctica,* no mide más que 13 mm. La mayoría sólo se puede ver con microscopio.

Tierra adentro se encuentran otras reservas de vida, algunas de ellas muy cerca del Polo Sur, donde se alzan los picos más altos de las montañas Transantárticas, denominados *nunataks,* palabra que los primeros exploradores tomaron del lenguaje inuit. Pero aquí no se encuentran plantas grandes; tan sólo algas y hongos microscópicos, bacterias y algunos protozoos.

Los menos prometedores de todos los oasis son los valles secos, que sólo se encuentran en una pequeña zona de la Tierra de Victoria, al sur de Nueva Zelanda. Los valles principales son tres, y fueron excavados por glaciares hace muchísimo tiempo. Pero desde hace por lo menos dos millones de años, cae en ellos muy poca nieve. En este tiempo, los glaciares han desaparecido por falta de aporte de material, y lo único que queda es un paisaje desnudo, terriblemente frío y completamente árido, con rocas peladas barridas por un viento implacable.

Hasta 1978 se creía que en los valles secos no existía vida, pero al examinar las rocas con potentes microscopios, los científicos han descubierto una de las comunidades vivas más sorprendentes de la Tierra. Bajo la superficie rocosa, en diminutas bolsas de aire, se han encontrado bacterias, hongos y algas que llevan una existencia frugal desde hace millones de años.

Atrapados en el interior de las rocas, estos supervivientes microscópicos se mantienen gracias al dióxido de carbono que se filtra hasta ellos, y a la energía solar, que les llega como un tenue resplandor, suficiente para que las algas elaboren por fotosíntesis pequeñas cantidades de alimento, que a su vez es aprovechado por las bacterias y los hongos.

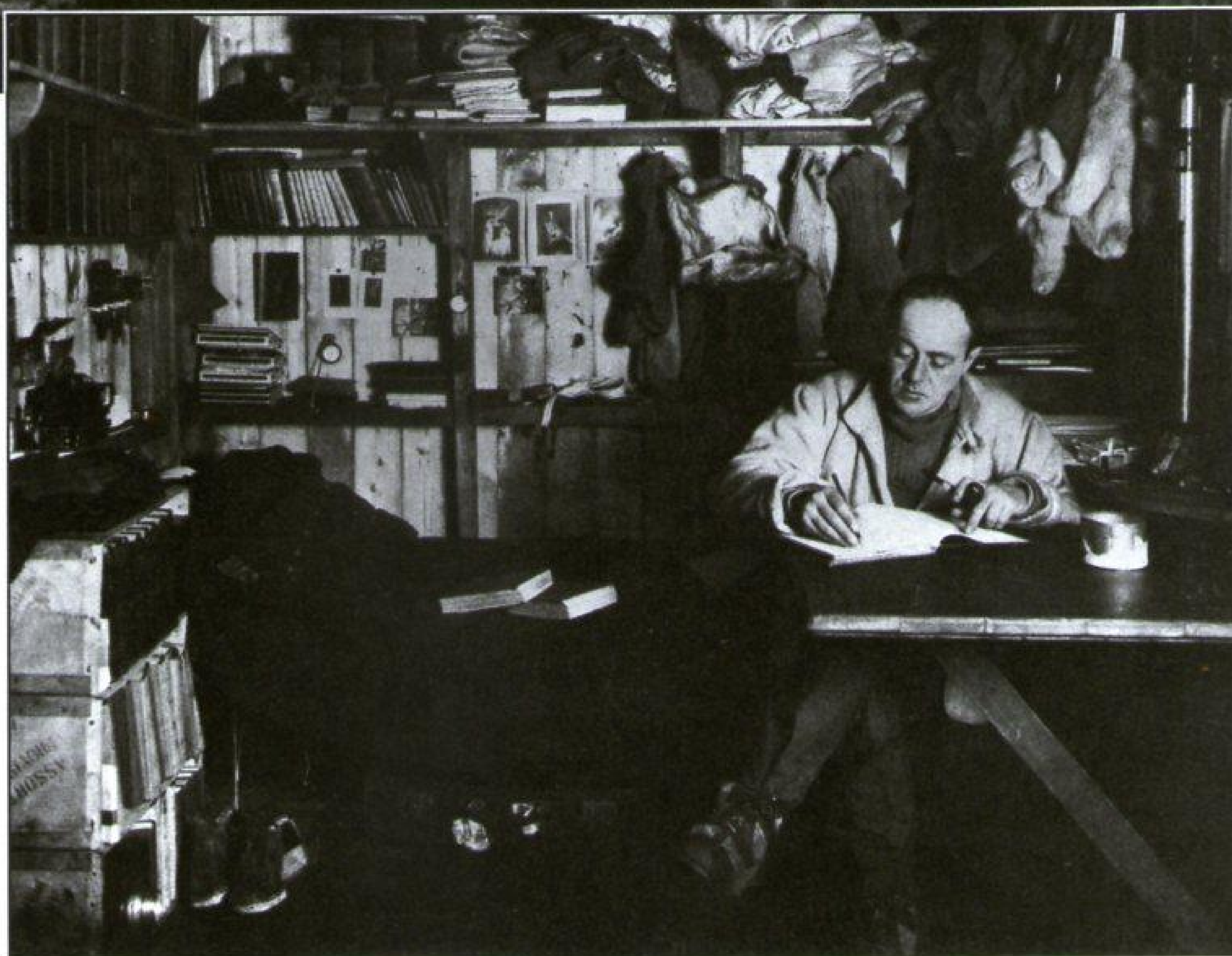
Como cualquier otro ser vivo, estos organismos necesitan agua; minúsculas gotas de humedad, procedentes de las escasas nevadas, penetran en las rocas, impidiendo que las frágiles criaturas se desequen.

En tierra firme, la vida escasea, pero en las aguas es más abundante que en casi ninguna otra parte del mundo. Fuertes co-

rrientes hacen circular constantemente el agua en torno al continente, enriqueciendo las capas superficiales con minerales disueltos. En muchos otros mares, la escasez de nutrientes minerales limita el crecimiento del fitoplancton, la capa de organismos vegetales microscópicos que flota en la superficie. Aunque invisible para el ojo humano, el fitoplancton es el equivalente marino de las praderas y los bosques terrestres.

Las temperaturas del agua son mucho más altas que las de tierra, y durante los meses de verano se recibe un suministro constante de luz realmente imprescindible para la fotosíntesis.

El abundante fitoplancton sirve de alimento a los diminutos componentes del zooplancton, entre los que destacan los grandes bancos de krill, animales semejantes a las quisquillas, que abundan en el océano Antártico, formando bancos que pueden cubrir 2.500 km². De día, sus cuerpos tiñen el



Scott, en su cabaña de cabo Evans, poniendo al día su diario; su última anotación, escrita el 29 de marzo de 1912, dice: «Nos vamos debilitando... el final no puede estar muy lejos.»

agua de color rosado: por la noche, iluminan el mar como luciérnagas acuáticas.

El krill constituye la dieta básica de toda clase de animales, desde las gigantescas ballenas azules a los pequeños pingüinos de Adelia.

Cinco especies de ballenas y cuatro de pingüinos se alimentan exclusivamente de krill, lo mismo que innumerables aves, tres especies de focas y, por lo menos, 20 especies de peces. No existe en la Tierra otro lugar donde un único organismo alimente a tantas y tan diversas especies; el porqué de esta insólita situación constituye un misterio.

No cabe duda de que la dependencia respecto al krill convierte a la Antártida en un ecosistema sumamente susceptible a la intervención humana. La pesca intensiva de krill para el consumo humano puede parecer atractiva a ciertas mentalidades, pero para los biólogos equivale a un desastre ecológico.



La Antártida representa la aventura definitiva para numerosos exploradores, científicos e incluso turistas. La exploración está bien organizada y muy mecanizada, pero el número creciente de visitantes y los planes de explotación de este magnífico territorio helado pueden destruir su frágil ecosistema, a menos que se ejerza un estricto control de las actividades. En este ambiente frío y seco, los procesos de descomposición se interrumpen. Los restos de esta base ballenera abandonada (a la derecha) permanecerán durante muchos años como monumento a la intromisión humana.

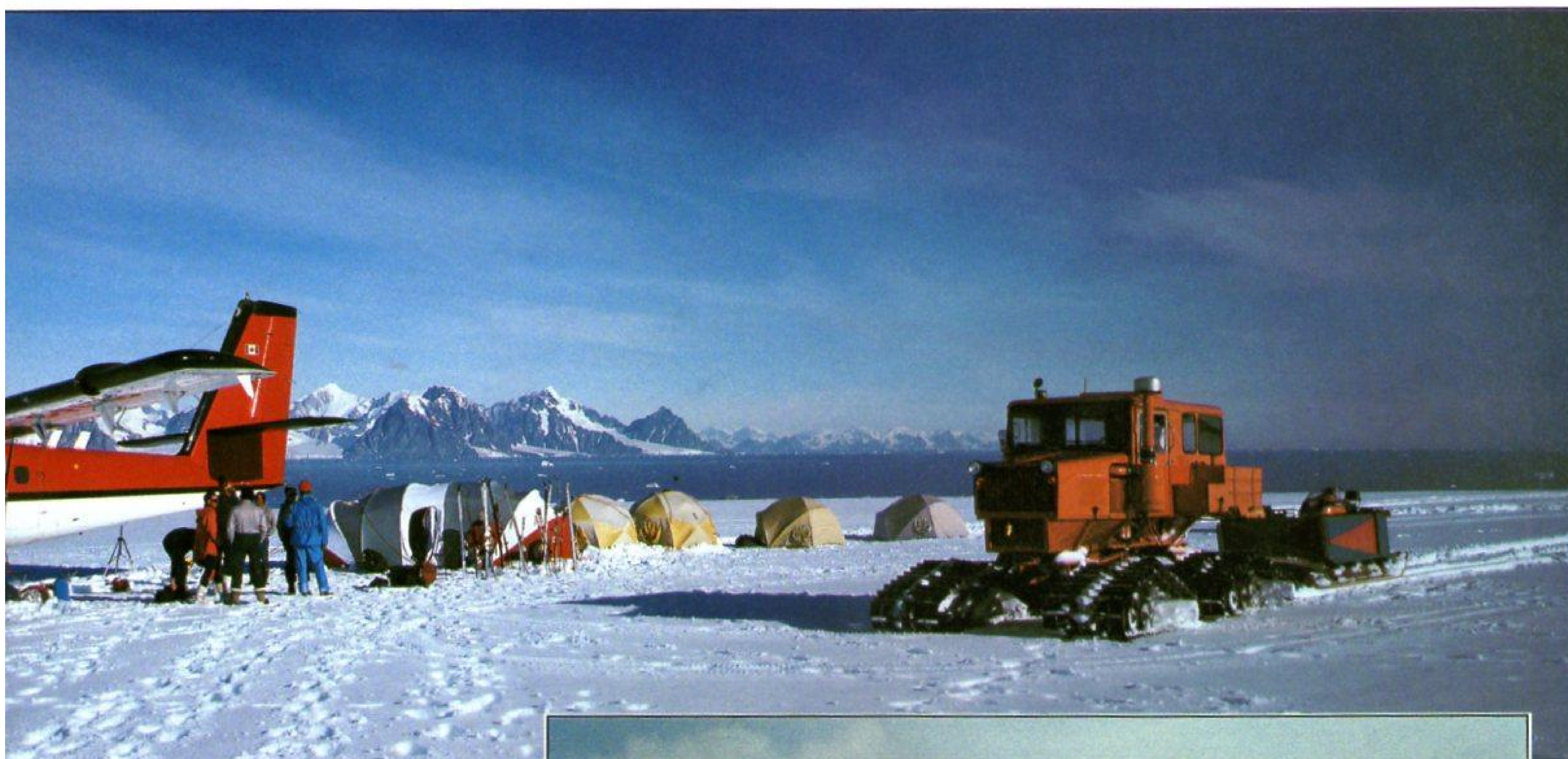
Casi toda la Antártida se encuentra contenida en el Círculo Polar Antártico, el punto donde el sol parece volverse atrás en su recorrido anual a través del cielo, permaneciendo anclado sobre el horizonte durante el solsticio de invierno. Más cerca del polo, el sol no sale en invierno durante semanas enteras, y la única luz que existe es el brillo fantasmal de las auroras australes.

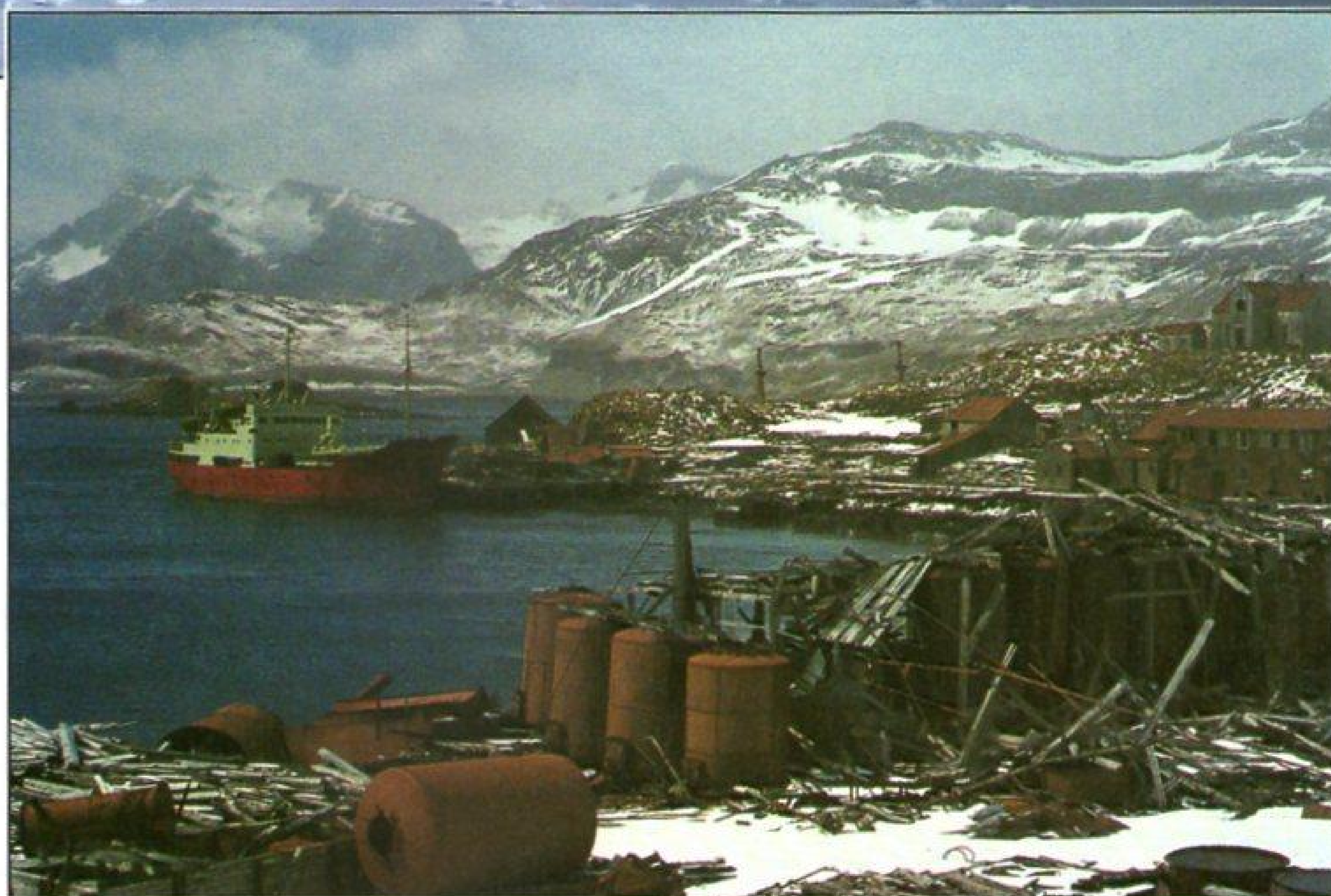
Sin embargo, el Círculo Antártico no es más que uno de los numerosos círculos que rodean y definen a este continente. El Polo Sur señala el extremo del eje de rotación de la Tierra y, en cierto modo, también el aire y el océano giran en torno a este eje, generando sistemas climáticos circulares, típicos de la Antártida. Sin la obstrucción de grandes masas de tierra como las que existen en el hemisferio norte, los vientos circumpolares soplan con fuerza inusitada en torno al planeta.

Otro de estos círculos es el llamado cintu-



En la Antártida se llevan a cabo investigaciones científicas muy variadas, incluyéndose inspecciones submarinas para medir la profundidad de los bancos de hielo y estudiar los bancos de peces. En tierra firme, los mineralogistas han recogido más de 7.500 fragmentos de meteoritos de ferroníquel de 1.300 millones de años de antigüedad, y que probablemente proceden de la Luna o de Marte, que todavía tenían actividad volcánica en aquella época.



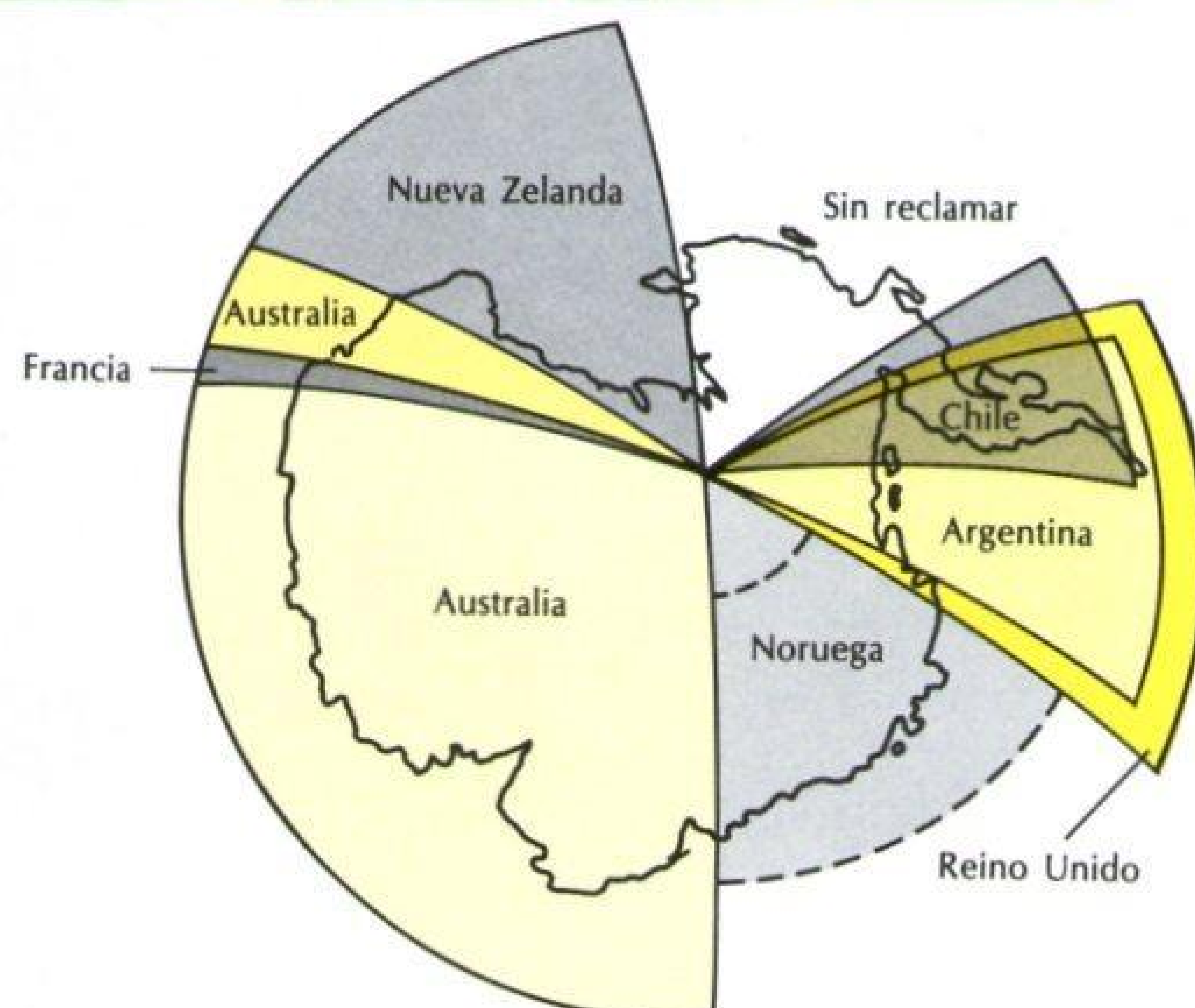


rón de las tormentas, generado por vientos fríos que bajan de las alturas de la Antártida por efecto de la gravedad. Cuando se encuentran con el aire relativamente caliente situado sobre el océano, el desequilibrio atmosférico provoca densas nieblas y terroríficas ventiscas.

También el océano gira en grandes círculos en torno al continente, aunque con movimientos más complicados. Cerca de la costa, las corrientes fluyen de este a oeste, arrastrando icebergs desprendidos de los glaciares. Pero a unos 2.000 km de la costa, el agua fría se encuentra con masas de agua más caliente, que circulan de oeste a este. Debido a su mayor densidad, el agua fría se hunde, y los icebergs que han flotado hasta aquí cambian bruscamente de dirección.

Al norte de esta línea de confluencia, conocida como la Convergencia Antártica, el agua contiene diferentes minerales y formas de vida. Los enormes bancos de krill se encuentran tan sólo dentro de la convergencia, y allí se concentran durante el breve verano los animales que se alimentan de krill.

Este punto de cita oceánico, de tan sólo unos kilómetros de anchura, rodea la Antártida como si fuera una muralla, señalando los confines del continente helado, el menos conocido de la Tierra.



El Tratado de la Antártida, firmado en junio de 1961, establece la condición internacional del continente, define y reconoce las reclamaciones territoriales de diversos países, prohíbe las operaciones militares, las explosiones nucleares y el vertido de residuos radiactivos, y declara la libertad de movimientos para los científicos y el intercambio de datos entre ellos.

La máquina del clima

El clima afecta a todos los seres vivos del planeta. En sus manifestaciones extremas, puede ser causa de sequías o inundaciones, o provocar estragos con la increíble fuerza de los huracanes y tornados. El clima contribuye a definir el paisaje y la economía de las naciones y, a nivel más local, puede provocar colapsos de tráfico, echar a perder unas vacaciones e incluso alterar nuestro estado de ánimo. Así pues, no resulta extraño que nos sintamos fascinados por su influencia y su carácter impredecible.

La humanidad se ha sentido siempre intrigada por los misterios del clima. Desde la antigüedad, se consideró a los dioses responsables de sus prodigios recurrentes: el rayo y el trueno, el hielo y la nieve, el viento y la lluvia. Y todos los pueblos han sentido la necesidad de ponerse a bien con los dioses, cuyo poder determina la diferencia entre el hambre y la abundancia, y cuya furia puede hacer caer el fuego del cielo.

Mediante cuidadosas observaciones y a base de experiencia, nuestros antepasados lograron discernir pautas en el clima, a partir de las cuales podían aventurar predicciones bien fundadas acerca de cuestiones como las mejores épocas para la siembra o la cosecha. En la actualidad, y a pesar de los satélites, los instrumentos de rastreo y otras brujerías tecnológicas de la meteorología moderna, gran parte de la sabiduría climatológica de nuestros ancestros se mantiene vigente. Y del mismo modo, muchos aspectos del clima continúan sin tener explicación.

El clima no es algo exclusivo de la Tierra. Todo planeta que rote sobre un eje y posea atmósfera tiene clima. Esto se ha comprobado en Júpiter, Marte, Saturno, Venus y Neptuno, mundos inhóspitos con un clima completamente diferente del nuestro. El carácter general del clima depende de la temperatura del planeta, la composición de su atmósfera y la cantidad de agua existente en su superficie.

La clave para entender el clima de la Tierra radica en el hecho de que la temperatura del planeta sea lo bastante alta como para que la mayor parte del agua se encuentre en forma líquida, a diferencia del hielo que cubre Marte y del vapor caliente de Venus. Desde el espacio, nuestro planeta se ve azul, con brochazos blancos: en verdad, no se



Nuestro planeta, cubierto de nubes de lluvias arrastradas por los vientos.

trata sino de un mundo acuático, y de mares y nubes.

El clima que experimentamos se genera en una capa de la atmósfera sorprendentemente fina, que sólo llega a 18-30 km de la superficie de la Tierra. La circulación de aire y nubes que determina el clima planetario tiene lugar en el seno de esta troposfera, donde la atmósfera nunca está inmóvil, porque en todo momento soplan vientos casi sobre todos los puntos de la Tierra.

Los vientos, fuerzas invisibles que contribuyen a definir el clima, se deben a diferencias de presión atmosférica. El viento siempre sopla desde una región de presión relativamente alta hacia una región adyacente donde la presión es más baja. Pero ¿qué ocasiona estas diferencias de presión? La explicación más simple es que las zonas ecuatoriales del planeta reciben más energía solar que las regiones próximas a los polos. El aire caliente situado sobre el ecuador se eleva y se desplaza hacia los polos, donde se enfría, desciende y vuelve a su lugar de origen.

Sin embargo, la realidad es mucho más complicada, debido en parte a la rotación de la Tierra. Esta rotación produce la fuerza de Coriolis, que desvía los principales sistemas de vientos en una serie de franjas oblicuas que rodean el planeta.

Estas franjas o zonas climáticas que rodean el mundo sufren, además, un ciclo anual de cambios climáticos, determinado por la inclinación del eje de rotación de la Tierra. Esta inclinación es la causa del ciclo anual de cambios estacionales, a lo largo del cual las bandas climáticas se comprimen en un hemisferio mientras se expanden en el otro, provocando el paso de invierno a verano, y viceversa.

Tanto para el lego como para el meteorólogo profesional, el clima es una constante causa de asombro. Cuando desentrañemos sus cómos y sus porqués, seremos capaces de apreciar su delicado equilibrio y los peligros que entraña interferir en él.

La fábrica de vientos

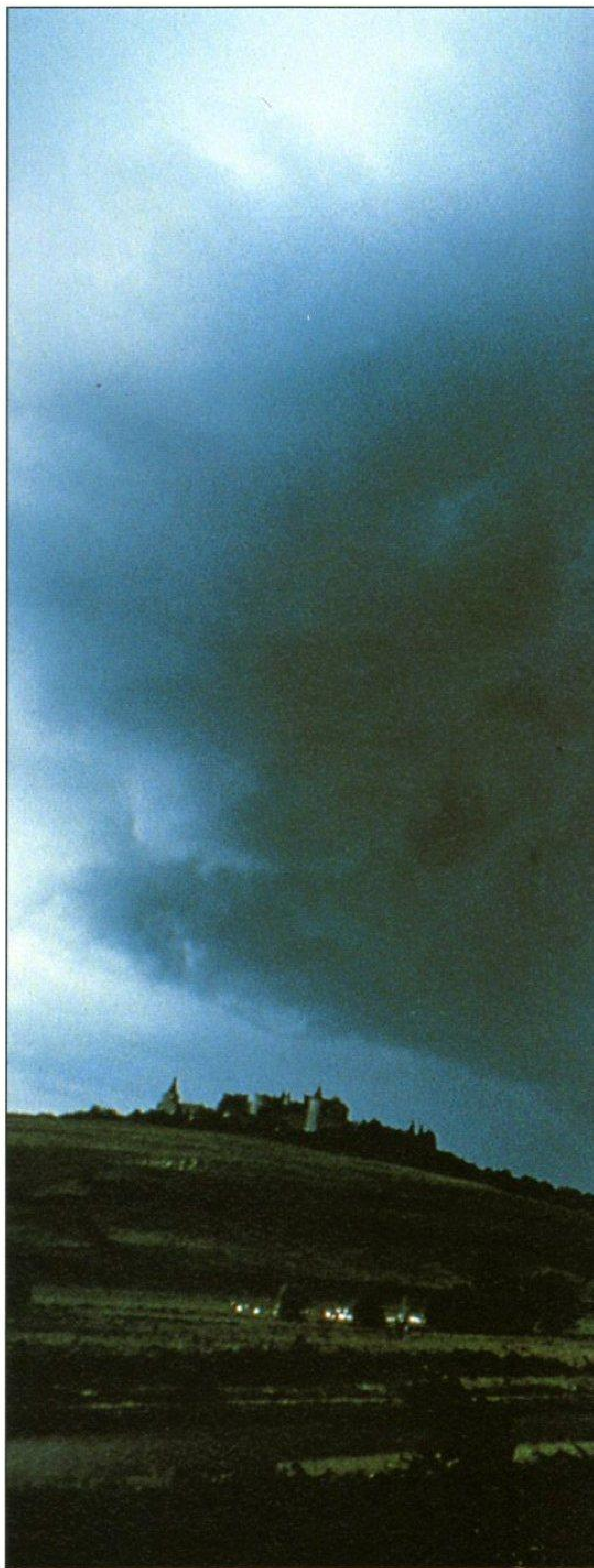
El clima no existiría de no ser por los vientos, verdadero motor de la maquinaria climática de nuestro planeta. Sin embargo, y a pesar de siglos de estudio, sus pautas y su mecanismo exacto de influencia sobre el clima siguen siendo un misterio, al menos en parte. La tecnología moderna nos ha proporcionado fascinantes imágenes de la atmósfera, tomadas desde satélites, pero lo que vemos en estas imágenes son las nubes y las tormentas, no los vientos. Y, dado lo incompleto de nuestros conocimientos sobre el viento, no resulta sorprendente que nuestras predicciones meteorológicas contengan tantas inexactitudes.

Nuestra incapacidad para predecir acertadamente el tiempo hace que resulte aún más sorprendente el que los pueblos primitivos lograran profundizar tanto en los misterios de la máquina climática del planeta. Los antiguos griegos fueron los primeros en reconocer la importancia de los vientos, a los que consideraban seres sobrehumanos.

En el año 40 a. C., los vientos fueron inmortalizados en un friso escultórico de la Torre de los Vientos, construcción octogonal erigida cerca de la Acrópolis de Atenas. En lo alto de la torre había una veleta que señalaba a la figura representativa del viento que soplara en el momento, permitiendo hacer ciertas predicciones. Por ejemplo, Noto (el viento del sur) significaba lluvia, mientras que Lipo (el del suroeste) era un viento favorable para la navegación.

El paso más importante hacia la comprensión de los vientos y el clima lo dieron los exploradores españoles, portugueses e ingleses que llegaron al Nuevo Mundo a partir del siglo XV. Los barcos que zarpaban de Europa solían poner rumbo al sur, en vez de navegar directamente hacia el oeste, para aprovechar los vientos alisios —del noreste—, que soplan desde la costa de África hasta el Caribe.

El inglés George Hadley (1682-1744), célebre fabricante de instrumentos, fue el primero en explicar la existencia de los vientos alisios y el hecho de que en el hemisferio



La meteorología es la incógnita definitiva, obra de poderes invisibles, ya que son los vientos los que le dan forma, desde las brisas más suaves a los huracanes más feroces, aunque nosotros sólo vemos los efectos de su paso. Los vientos hacen circular masas de aire caliente desde el ecuador y de aire frío desde los polos, arrastran nubes de lluvia vivificadora y provocan tormentas devastadoras. Si no fuera por los vientos, el clima no tendría misterios.





norte soplen desde el noreste y en el sur desde el sureste. En 1735, Hadley sugirió que la intensa radiación solar que cae sobre las regiones ecuatoriales hace que el aire se caliente, se eleve y se desplace hacia los polos. Al enfriarse de nuevo, el aire desciende y vuelve a acercarse al ecuador, sustituyendo al aire que se eleva en ese momento y dando lugar a los vientos alisios.

Hadley dedujo que los vientos alisios soplan desde el este en ambos hemisferios porque la Tierra gira hacia el este. Explicó que el aire que se dirige hacia el ecuador desde las altas latitudes se queda rezagado respecto a la superficie de la Tierra, que gira con más rapidez en el ecuador que en las altas latitudes, y por eso parece llegar desde el este. Este efecto de la rotación, denominado efecto Coriolis en honor del matemático francés Gaspard Gustave Coriolis (1792-1843), parece ser la causa de que todos los vientos soplen en el sentido de las agujas del reloj en el hemisferio norte, y en sentido contrario en el hemisferio sur.

Durante el siglo XIX, los científicos empezaron a acumular abundante información sobre la presión atmosférica en la superficie. Las mediciones de la presión atmosférica indican el movimiento vertical de los vientos. Si la presión es baja, quiere decir que el aire está ascendiendo; si es alta, que está descendiendo. En 1855, esta información permitió a un maestro norteamericano, William Ferrel (1817-1891) presentar el primer modelo tridimensional de los vientos del mundo. Lo mismo que Hadley, Ferrel suponía que el aire húmedo y caliente del ecuador se eleva, desplazándose en dirección a los polos. Al llegar aproximadamente a los 30 grados de latitud, en ambos hemisferios, el aire se enfría y desciende, creando una zona de alta presión en la superficie, desde la cual el aire regresa al ecuador bajo la forma de vientos alisios.

Estos cinturones de aire descendente coinciden con una franja de desiertos que rodea al planeta, y que incluye el Sahara en África, el Mojave en Norteamérica y el gran

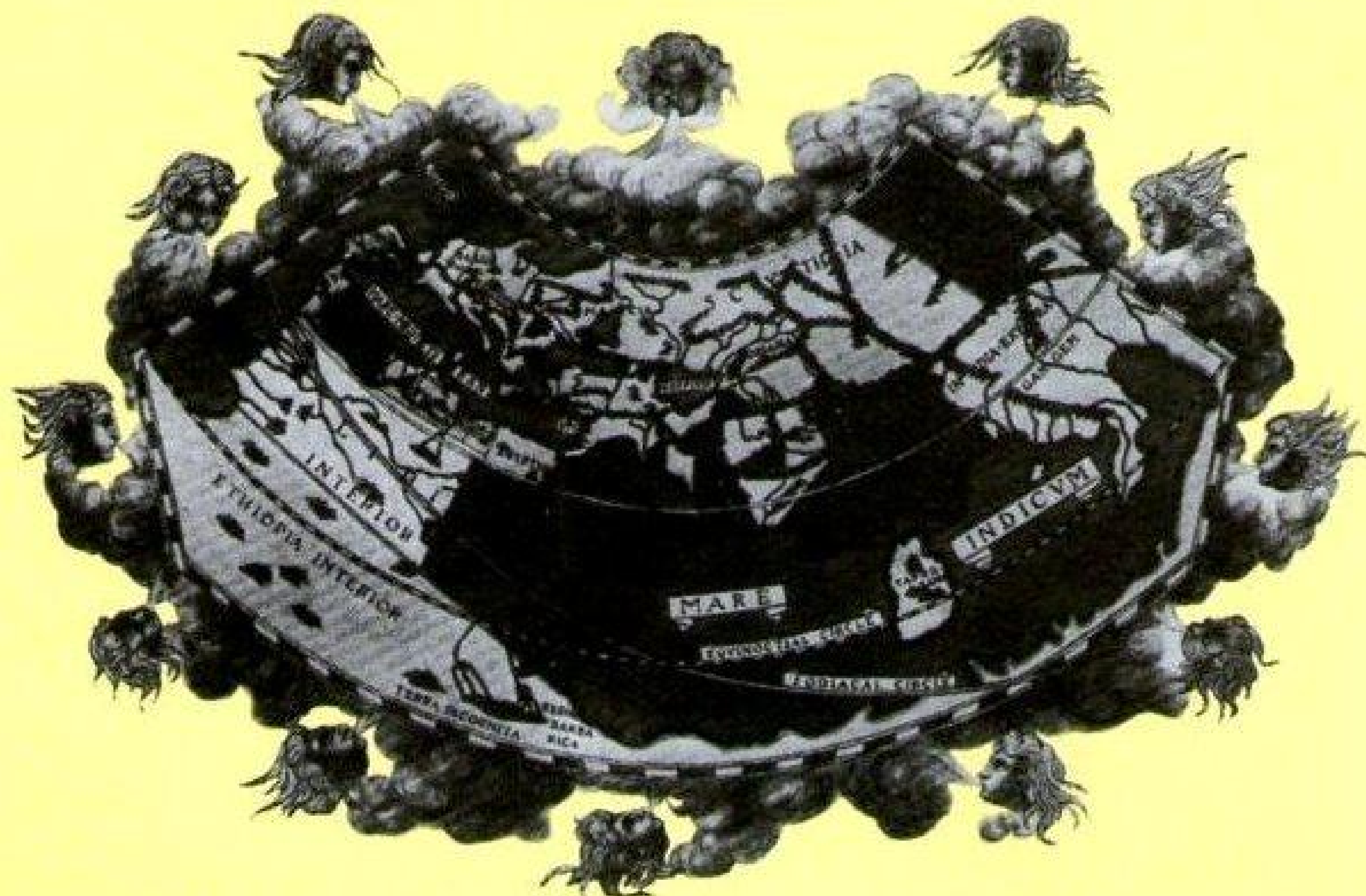
Las franjas de nubes del tipo cirros indican la dirección de la corriente que circula a 11-13 km de la superficie de la Tierra. Estas nubes, generadas por vientos turbulentos, pueden extenderse a lo largo de 1.610 km.

Vientos de locura

Algunos vientos, en particular los cálidos y secos, ejercen tal impacto sobre la vida humana que han recibido nombres especiales.

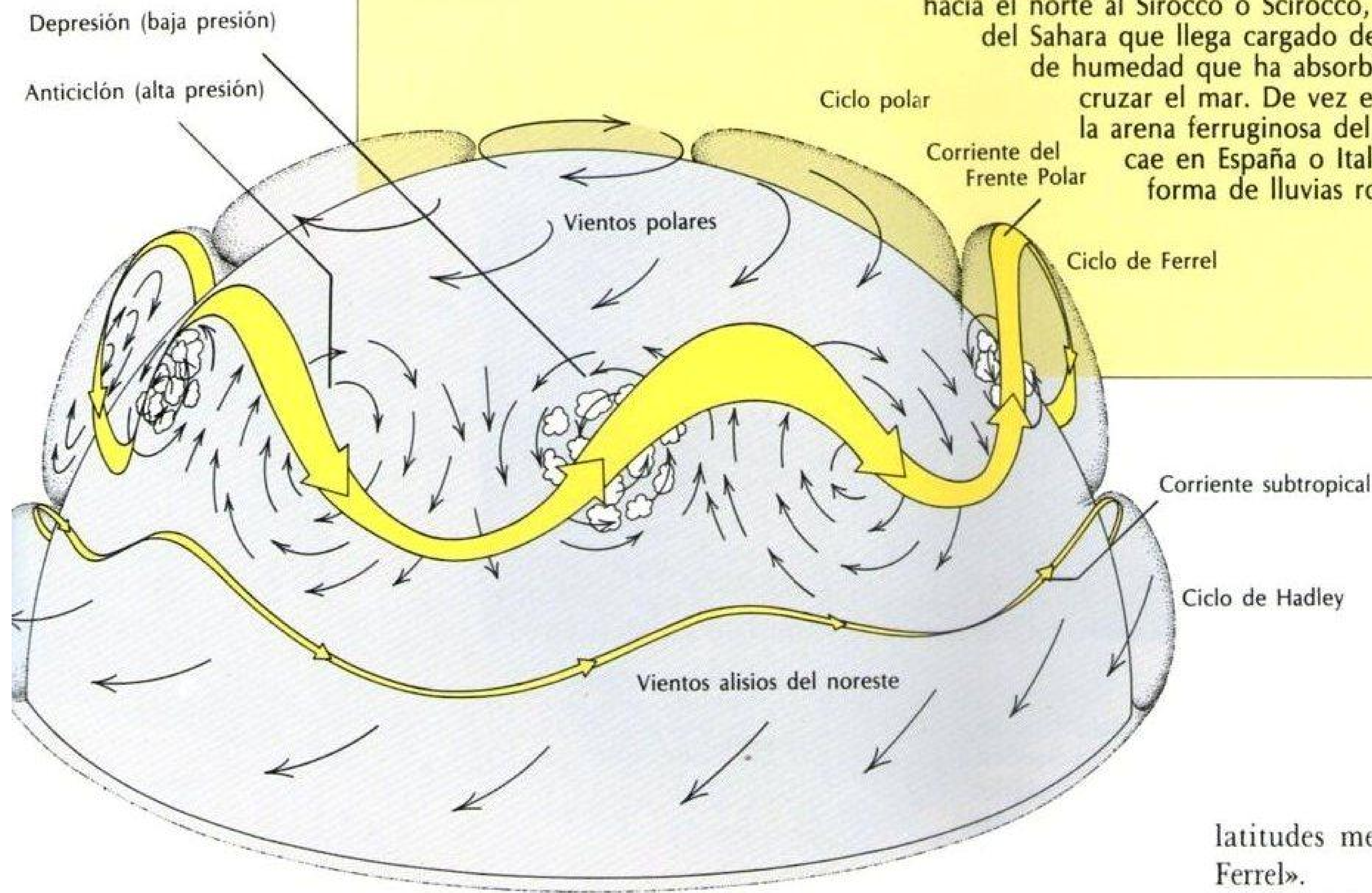
El Chinook, llamado también «comedor de nieve» por los indios canadienses, es un viento cálido y seco que sopla en las laderas orientales de las Montañas Rocosas. Es muy apreciado por los ganaderos, ya que puede fundir la capa de nieve en pocas horas, dejando los pastos al descubierto.

El Föhn, de las zonas alpinas de Europa, provoca irritabilidad, jaqueca, insomnio y ansiedad en un 25 por 100 de las personas. En Suiza y Alemania se ha observado un aumento del número de suicidios y de accidentes industriales y de tráfico cuando sopla este «viento de las brujas».



Los vientos aún se representaban con formas humanas cuando se realizó esta copia del mapa del mundo en el siglo II, según Tolomeo.

En primavera, las tormentas que atraviesan el Mediterráneo en dirección este pueden atraer hacia el norte al Sirocco o Scirocco, el viento del Sahara que llega cargado de arena y de humedad que ha absorbido al cruzar el mar. De vez en cuando, la arena ferruginosa del desierto cae en España o Italia en forma de lluvias rojas.



La corriente del Frente Polar controla gran parte del clima en las latitudes medias y altas, provocando la formación de depresiones frontales y determinando el curso que éstas toman.

desierto de Victoria en Australia. Estos paisajes desolados se han creado por efecto del aire que desciende de la atmósfera superior, comprimido y despojado de toda su humedad. En el Atlántico norte, esta zona corresponde a las llamadas «Latitudes del Caballo»; al parecer, el nombre se debe a que el ganado que se transportaba desde Europa al Nuevo Mundo moría con frecuencia de hambre y sed al llegar a esta altura, cuando los barcos quedaban detenidos durante largos períodos en el mar encalmado.

Parte del aire que desciende en torno a los 30 grados de latitud no se dirige hacia el ecuador, sino hacia los polos, originando los vientos cálidos del oeste y del suroeste, característicos de las latitudes medias, entre los 30 y los 60 grados. Al llegar a los 60 grados, estos vientos cálidos, que van acumulando humedad al pasar sobre los océanos, chocan con el aire frío y seco procedente de los polos.

Ferrel opinaba que el denso aire polar corta el paso a los vientos cálidos del oeste, empujándolos hacia arriba y hacia el ecuador, y cerrando el ciclo de circulación de las latitudes medias, denominado «Ciclo de Ferrel».

El modelo eólico de Ferrel se aceptó sin discusión durante cincuenta o sesenta años, hasta que los meteorólogos empezaron a especular sobre la contribución al clima de las frecuentes tormentas propias de las latitudes medias y altas. La respuesta la proporcionó, durante la primera guerra mundial, un equipo de investigadores noruegos dirigido por Vilhelm y Jakob Bjerknes.

Según su explicación, los vientos del oeste de latitudes medias y los vientos polares del este se enfrentan como dos ejércitos en guerra, a lo largo de un frente situado en torno a la latitud 60, que los noruegos llamaron «el

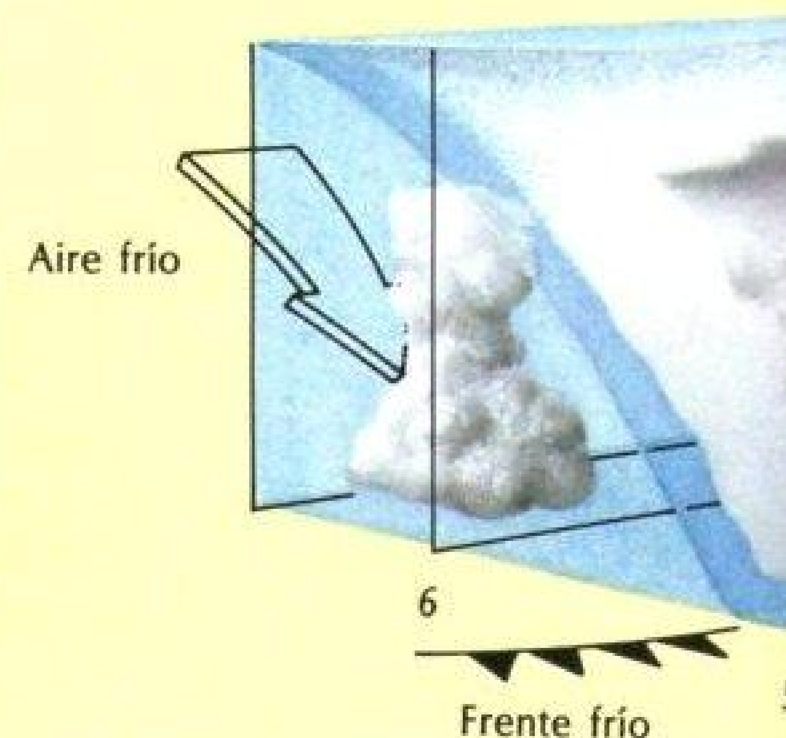


2 La formación de altostratos que nublan el sol y se van haciendo cada vez más densos, a la vez que descienden, indica que se aproxima el frente cálido.

El desarrollo de una depresión

Las depresiones turbulentas son como enormes calderos en cuyo interior chocan los vientos calientes y fríos; a los bordes frontales de estos vientos o masas de aire se los llama frentes fríos y frentes cálidos. Las masas de aire se entremezclan durante varios días, pero durante la mayor parte de este tiempo mantienen su temperatura y humedad, lo que da lugar a una secuencia previsible de nubes, precipitaciones, vientos y temperaturas.

1 Las nubes ligeras, del tipo cirro, anuncian una depresión frontal; pero ésta aún se encuentra a varias horas de distancia.



Frente Polar». El resultado del choque es la formación de enormes remolinos, algunos de cientos o miles de kilómetros de diámetro, que se desplazan de oeste a este. Estas tormentas, con vientos que se elevan, girando en sentido contrario al de las agujas del reloj, se denominan ciclones o depresiones frontales. Intercaladas entre estos ciclones hay zonas tranquilas de alta presión, llamadas anticiclones, donde el aire desciende y de donde parten vientos ligeros.

A pesar de los avances realizados en el estudio de los sistemas climáticos de latitudes medias, la precisión de las predicciones meteorológicas resultó muy inexacta hasta los años treinta. Una de las razones es que resultaba imposible predecir cuándo se formaría una depresión frontal y qué curso seguiría ésta durante sus tres o cuatro días de existencia. Por fin, durante la segunda guerra mundial se realizó un descubrimiento sorprendente.

En 1944, las tripulaciones de los bombarderos norteamericanos que se dirigían a atacar Tokio quedaron asombradas al encontrar vientos excepcionalmente fuertes a grandes alturas, que aumentaban su velocidad de vuelo hasta en 160 km por hora cuando volaban rumbo al este, y la reducían de manera similar al volar hacia el oeste, contra el viento. Las investigaciones realizadas después de la guerra revelaron que los vientos formaban estrechas «cintas» onduladas de aire, de anchura no superior a los 480 km y de menos de 3 km de grosor, que los meteorólogos llamaron «corrientes de propulsión»



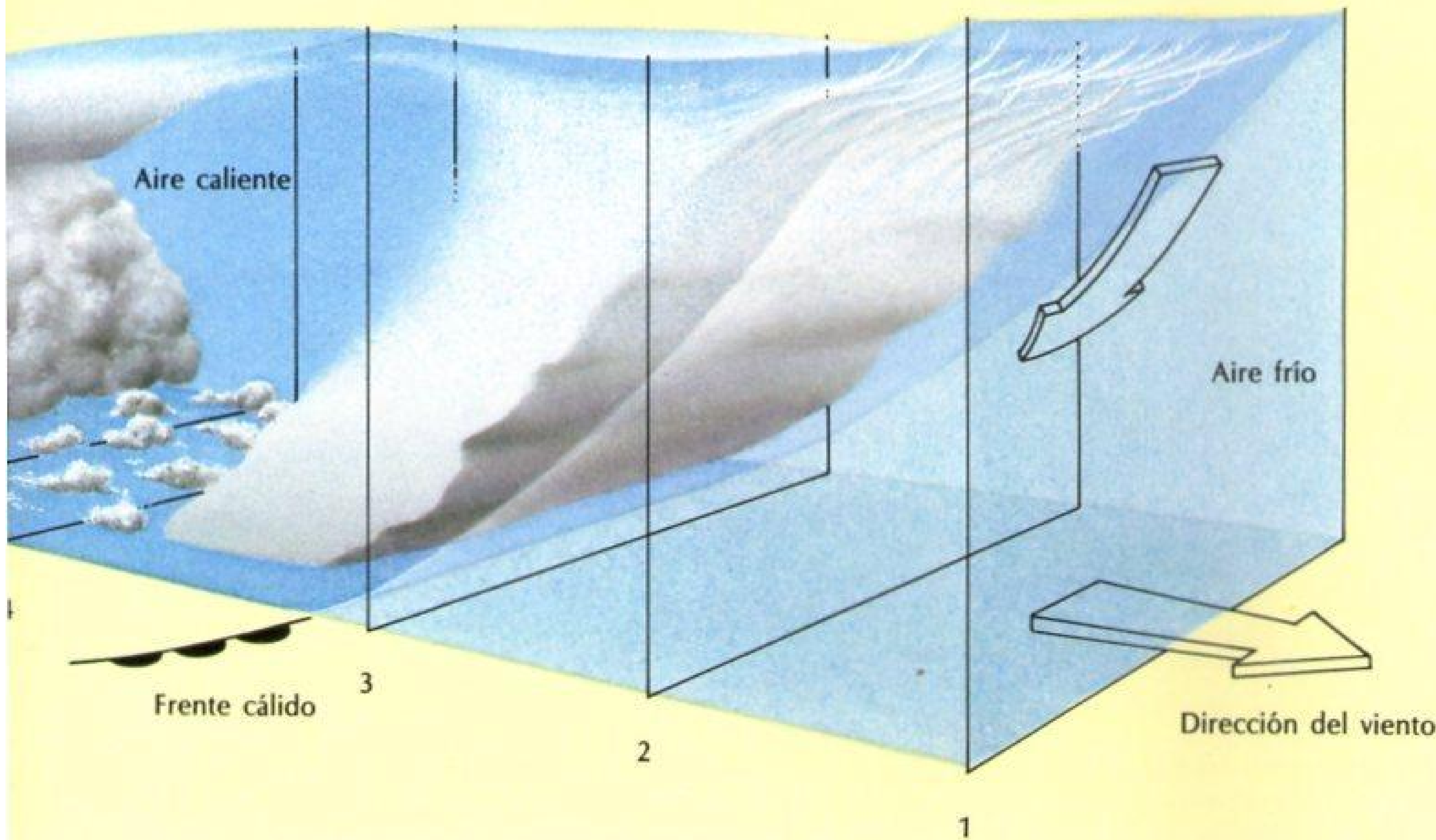
3 *Los estratos que preceden al frente cálido provocan lloviznas o lluvias moderadas durante varias horas.*



4 *Los estratos y estratocúmulos del sector cálido representan un breve respiro antes de la llegada de nuevas nubes de lluvia.*



5 *El paso del frente frío se caracteriza por los negros nubarrones que traen fuertes lluvias.*



6 *Los cúmulos, que se amontonan formando cumulonimbos o nubes de tormenta, provocan chaparrones fuertes pero de poca duración, antes de que el cielo se despeje.*



y que rodean el globo a velocidades de 160 a 240 kilómetros por hora, llegando en ocasiones a los 480 km/h.

La energía que genera la más importante de estas corrientes, la Corriente del Frente Polar, se deriva del pronunciado gradiente de temperaturas entre los vientos cálidos del oeste y los vientos polares del este, en las capas altas de la atmósfera y entre los 50 y los 60 grados de latitud. Esta corriente describe una trayectoria sinuosa alrededor del planeta, dirigiéndose primero hacia los polos y después hacia el ecuador. En su camino hacia los polos, la corriente se eleva y ejerce una suave succión sobre la atmósfera que tiene debajo, atrayendo el aire en esta parte de su recorrido. La rotación de la Tierra añade un movimiento giratorio a la convergencia de masas de aire templadas y frías, y se genera una depresión frontal. Cuanto más rápida sea la corriente, más intensa será la depresión.

Una vez creada, la depresión frontal se dirige hacia el este, siguiendo la trayectoria sinuosa de la corriente de propulsión, a una velocidad aproximada de 48 kilómetros por hora. Mediante globos y aparatos de gran altura, los meteorólogos pueden seguir la posición de la corriente y predecir por fin dónde es más probable que se formen depresiones.

Pero tan pronto como se desentraña un misterio, otro ocupa su lugar: la corriente de propulsión cambia sus pautas sin que se conozcan las razones; y mientras no se averigüen éstas, las predicciones seguirán siendo inseguras.

La serpiente enroscada

El mal tiempo puede trastornar nuestros planes mejor trazados, y de vez en cuando puede ser tan violento que ponga en peligro nuestros hogares y pertenencias, e incluso nuestras vidas.

La meteorología moderna se enfrenta al reto de desentrañar el misterio de estas condiciones climáticas extremas, para poder predecirlas con exactitud y adoptar medidas preventivas.

Uno de los mayores peligros climáticos para los habitantes de los trópicos es el ciclón tropical: una tormenta giratoria de unos 800 km de diámetro, con un característico «ojo» libre de turbulencias en su centro, de 16 a 40 km de diámetro, alrededor del cual soplan vientos violentísimos.

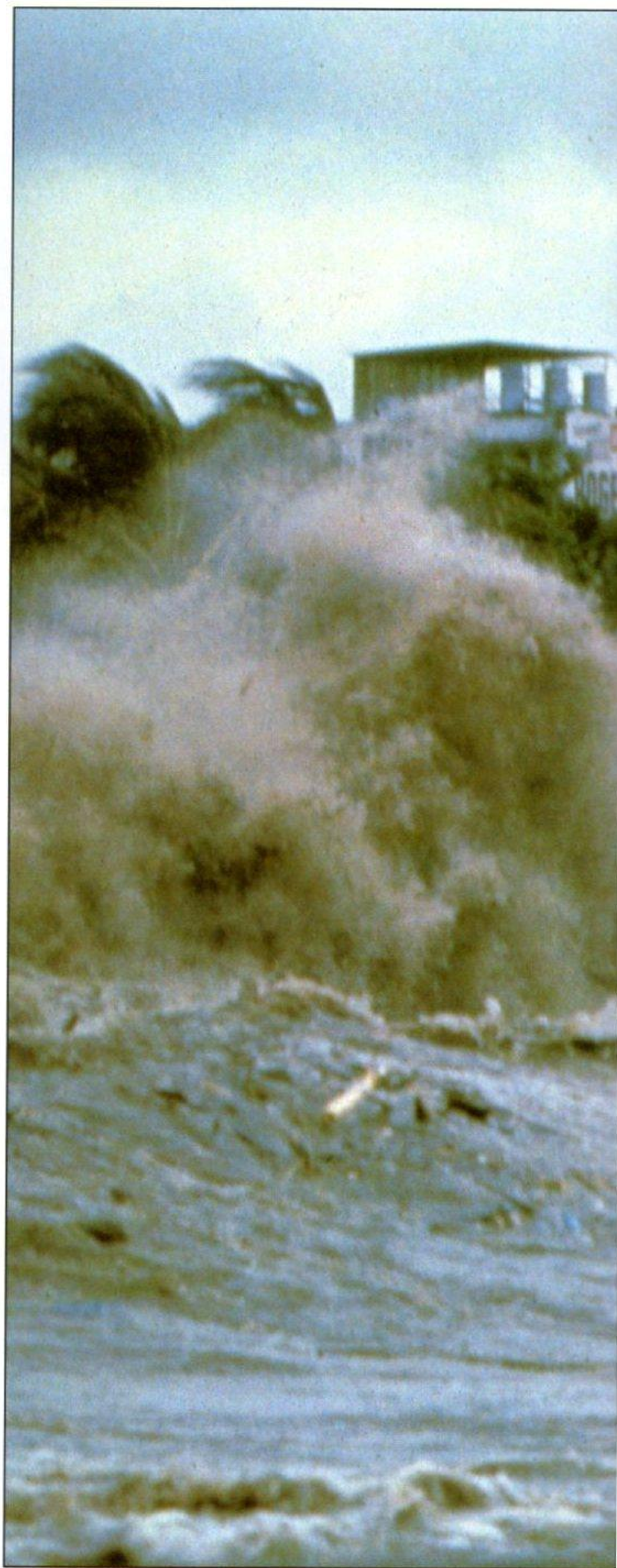
Cada año se forman sobre los océanos de 80 a 100 de estas tormentas, que provocan daños por valor de 10.000 millones de dólares y ocasionan por término medio unas 20.000 muertes.

En el océano Atlántico se llaman huracanes; en el Pacífico norte, tifones: en Filipinas, baguíos, y en el océano Índico y la zona de Australia, ciclones.

El término ciclón deriva del griego *kyklon*, que significa serpiente enroscada. La palabra huracán la empleaban los nativos de América Central para describir un viento fuerte, y puede derivar del nombre de Hunraken («Corazón del Cielo»), dios maya de las tormentas.

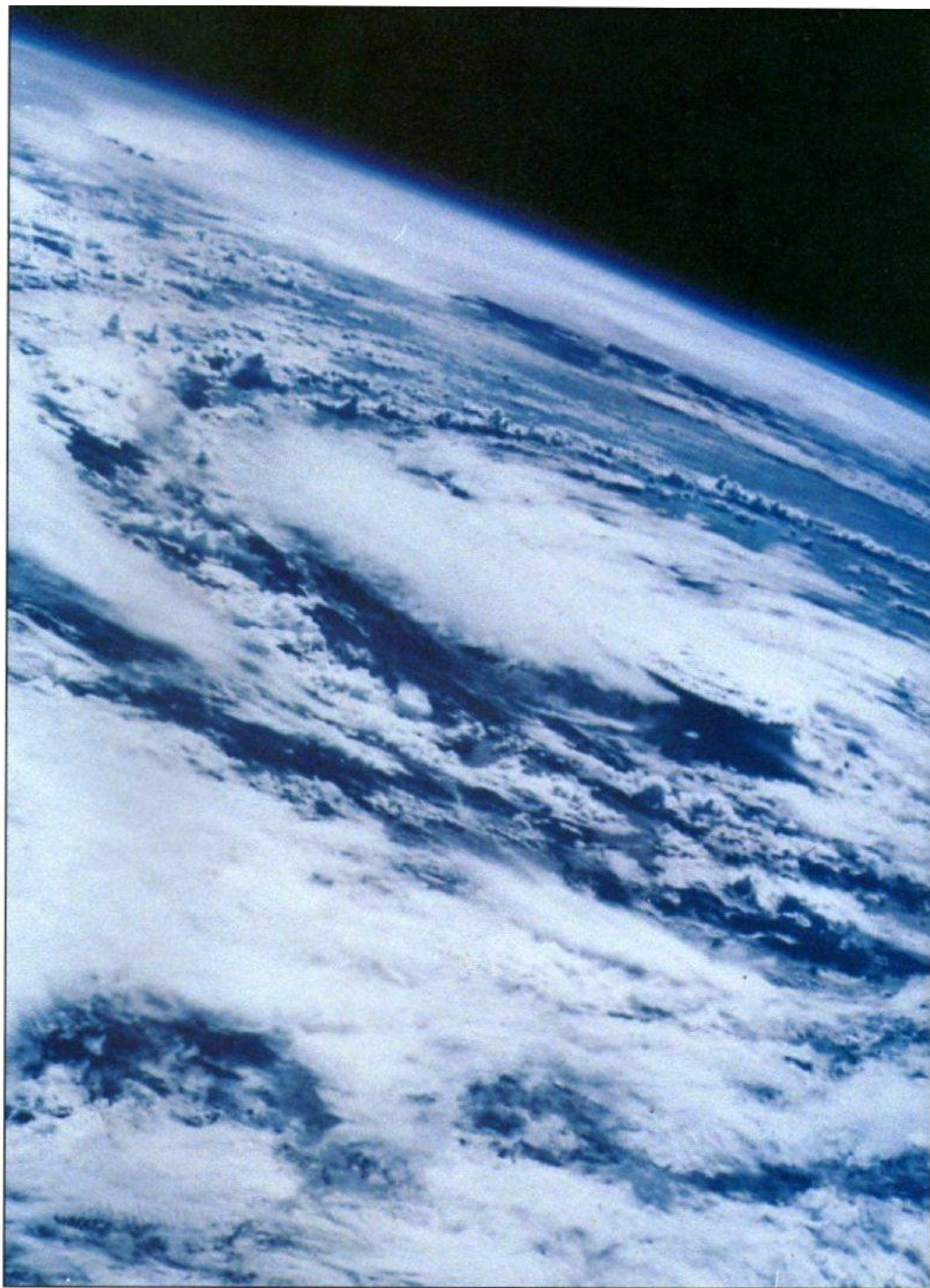
En la actualidad, a cada ciclón tropical que se forma en el Atlántico se le asigna un nombre de persona, empezando por la letra A al comenzar el año y siguiendo con el resto del alfabeto.

El proceso de transformación de una tormenta normal en un huracán devastador encierra tantas incógnitas que los meteorólogos sólo pueden decirnos lo que ellos creen que sucede. En el Atlántico Norte, el punto de partida es una pequeña e inocua tormenta de lluvia englobada en los vientos alisios frente a las costas de África Occidental. Muchos de ellos se originan en los doldrums, o zona de calmas ecuatoriales.



En agosto-septiembre de 1979, los fortísimos vientos del huracán David levantaron olas monstruosas que se abatieron con terrible fuerza sobre las islas del Caribe, provocando la muerte de cientos de personas, destruyendo miles de hogares y devastando las plantaciones. En su desplazamiento a lo largo de la costa de los Estados Unidos, el huracán generó, además, una serie de 34 tornados.





Estas reducidas zonas sin viento se encuentran entre los 3 y los 7 grados de latitud a ambos lados del ecuador, donde confluyen las circulaciones ecuatoriales de cada hemisferio o «ciclos de Hadley». En estas zonas, los barcos pueden permanecer encalmados durante días o semanas enteras, mientras los vientos alisios convergen muy por encima de la superficie, sin apenas agitar las aguas ni aliviar el calor sofocante. Las embarcaciones quedan a la deriva en las corrientes oceánicas, y lo único que pueden hacer sus tripulantes es desear fervientemente caer cuanto antes bajo la influencia de los vientos alisios.

Para desgracia de los antiguos navegantes, estas zonas de calma varían de posición según las estaciones, desplazándose hacia el norte o hacia el sur.

Sin embargo, el término «zonas de calma» resulta engañoso, pues de vez en cuando la quietud de estas regiones se ve alterada por violentas tormentas de viento, lluvia y truenos, que, si se desplazan hacia el polo hasta encontrarse con los alisios, pueden convertirse en el núcleo de un huracán.

Muchas de estas tormentas se desplazan miles de kilómetros hacia el oeste a través del Atlántico, sin desarrollarse más: pero de vez en cuando, algún factor desencadena su terrorífica transformación en huracán devastador.

La causa podría ser un período de intenso calentamiento de la superficie del océano, cuya temperatura puede llegar a superar los 27 °C; también podría achacarse a la acción de bombeo ejercida por los vientos de altura, bajo los cuales pasa la tormenta.

Sea cual sea la causa, los vientos de la tormenta se vuelven sobre sí mismos, iniciando el ciclo giratorio tan característico de los huracanes.

Las bandas tormentosas espirales ascienden con rapidez a lo alto de la atmósfera, y los vientos llegan a alcanzar velocidades de 120 km por hora. Cada año se originan en el Atlántico más de 100 perturbaciones con este potencial, pero sólo unas seis de ellas llegan a transformarse en huracanes.

El movimiento y desarrollo de los ciclones tropicales se vigila atentamente por medio de satélites, radar y boyas meteorológicas, e incluso algunos pilotos se han atrevido a penetrar con sus aviones en el ojo del huracán, atravesando las nubes turbulentas que lo cubren, para medir la velocidad del viento y la presión del aire. Pero aun con esta detallada información, procesada por avanzados ordenadores, resulta terriblemente difícil predecir el curso de un huracán.

En los Estados Unidos, el error medio en las predicciones del punto por donde el ojo del huracán cruzará la costa es de 187 km en predicciones de veinticuatro horas, y de 399 km en predicciones de cuarenta y ocho horas.

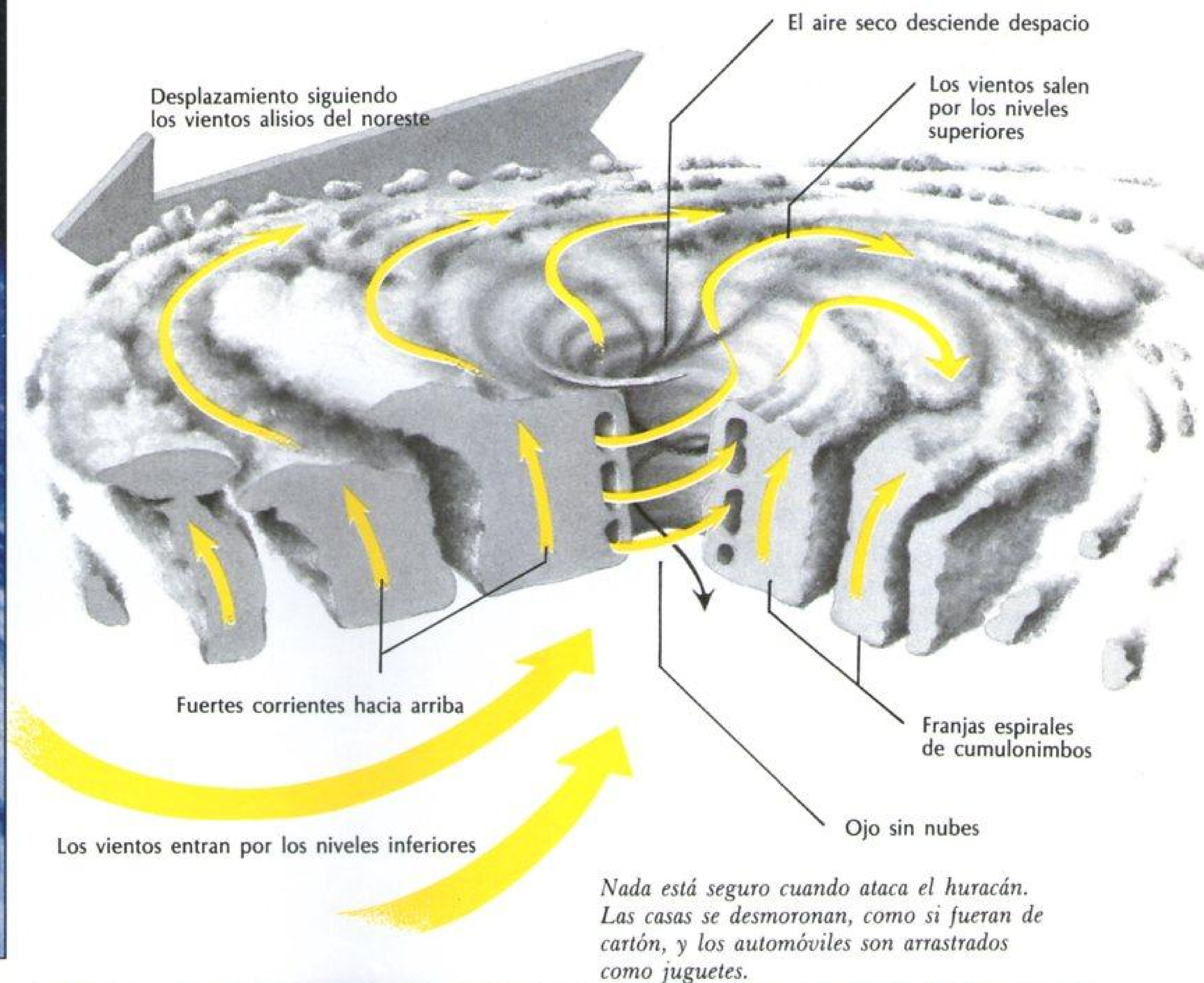
La imposibilidad de reducir este error ha provocado numerosos debates acerca de las pautas de desplazamiento de los huracanes; parece ser que el ojo del huracán se mueve de manera errática, bajo la influencia de corrientes variables.

Es importante corregir estos fallos, ya que si se dan avisos de evacuación incorrectos, la gente tenderá a no prestar atención la próxima vez que reciban un aviso. Por ejemplo, en agosto de 1979 se evacuó a 50.000 residentes de Miami Beach en previsión de la llegada del huracán David, pero éste pasó por West Palm Beach, 80 km al este. En agosto de 1980, bajo la amenaza del huracán Allen, cientos de miles de personas huyeron de la costa de Texas, ante la predicción de vientos de 322 km por hora; pero el huracán atravesó la costa sur, más despoblada, y los vientos no pasaron de 117 km/h. Naturalmente, las predicciones a corto plazo —doce horas, por ejemplo— resultan más exactas, pero por lo general se necesita mucho más tiempo para evacuar una zona de peligro.

Tal vez lo mejor que podrían hacer los



El interior de un huracán
El calentamiento del océano desprende energía, creando franjas espirales de tormentas eléctricas y fuertes vientos en torno a un «ojo» sin nubes. En este plano oblicuo del huracán David (a la izquierda), *el ojo resulta poco visible, pero se aprecia a la perfección la terrible fuerza del enorme torbellino de nubes. Si se transformara en electricidad la energía liberada en un día por un huracán, con ella bastaría para abastecer a los Estados Unidos durante seis meses.*



Nada está seguro cuando ataca el huracán. Las casas se desmoronan, como si fueran de cartón, y los automóviles son arrastrados como juguetes.



habitantes de las costas sería seguir el ejemplo de los indios seminolas de Florida, y observar el comportamiento de las aves, las ratas, e incluso los caimanes, para saber si va a pasar un huracán. En 1944, Florida se vio amenazada por dos huracanes. Al acercarse el primero, la tribu abandonó la zona, aunque la Oficina Meteorológica Federal predecía que no pasaría por Florida. La segunda vez, los seminolas no se movieron, mientras que la Oficina Federal dio una alarma de evacuación. Los indios acertaron en las dos ocasiones.

La energía que impulsa y mantiene el huracán procede del calentamiento del mar. El sol evapora el agua, y el vapor asciende y se condensa, formando densas nubes de tormenta. Al condensarse, el vapor desprende

una enorme cantidad de energía, que empuja los vientos.

No obstante, a pesar de la increíble fuerza de los huracanes, algunos científicos estadounidenses opinan que se los podría controlar.

El sistema consistiría en verter productos químicos sobre las nubes, en un círculo a cierta distancia del ojo del huracán, lo cual provocaría más lluvia, que a su vez desprendería más calor y generaría otra «pared» de nubes. Se supone que esta nueva pared reduciría el aporte de energía a la tormenta inicial, haciendo disminuir la fuerza de los vientos. Según parece, esto dio resultado en 1969, cuando los experimentos del Proyecto Stormfury lograron reducir en un 30 por 100 la intensidad de los vientos del huracán Debbie.

Pero desde entonces no se ha logrado ningún éxito, y los meteorólogos son partidarios de actuar con prudencia, ya que estos experimentos podrían provocar perturbaciones en otras zonas del mundo. Tampoco olvidan lo sucedido en 1947, cuando se realizó el primer intento de controlar un huracán. En el momento de proceder a la «siembra química», el huracán se estaba alejando de la costa, pero poco después cambió de dirección, provocando graves daños en Georgia.

En las poblaciones costeras e isleñas, el peligro incluye vientos de enorme velocidad, tremendos oleajes y fuertes lluvias. La presión del aire en el ojo del huracán da una medida de la violencia potencial del mismo. Cuanto más baja sea la presión, más rápidos serán los vientos, más altas las olas y más intensas las lluvias.

En condiciones normales, la presión atmosférica en la superficie oscila entre 980 y 1.030 milibares. En cambio, la mayoría de los huracanes tienen presiones centrales mucho más bajas; el huracán Gilbert, que se formó en el golfo de México y devastó Jamaica en septiembre de 1988, alcanzó un récord de baja presión: 885 mb; en consecuencia, generó vientos de 274 km/h, con ráfagas que superaban los 322 km/h.

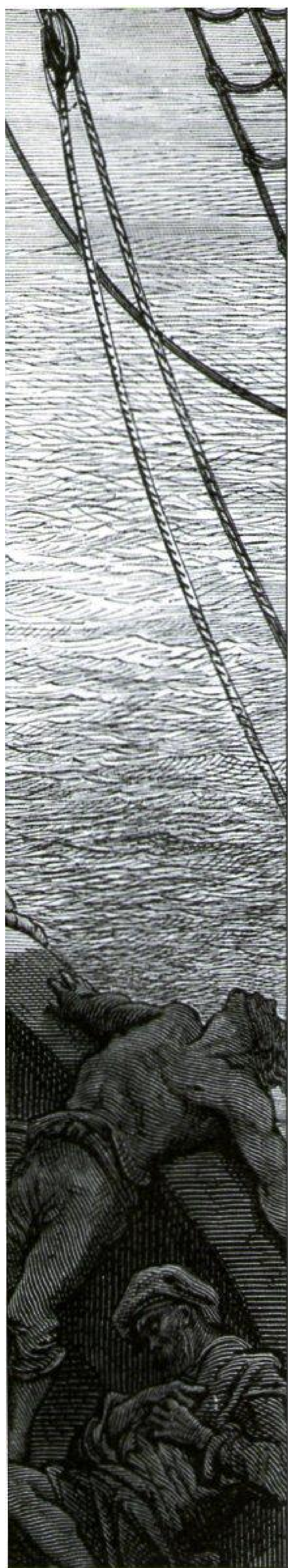
En septiembre de 1985, durante el paso del huracán Gloria, se descubrió un inesperado efecto de la baja presión. Al pasar el huracán por Long Island, Nueva York, varios hospitales comunicaron un aumento de la tasa de nacimientos de bebés prematuros; esto suponía que la bajada de presión aceleró los partos.



Además, la baja presión atmosférica hace que se eleve el agua del mar, formándose así una enorme cúpula de agua que puede alcanzar los 80 km de anchura y barre la costa en el punto de contacto con el ojo del huracán.

Cuando esta cresta de agua llega a la línea de costa, las olas pueden elevarse más de 4 m por encima del nivel medio del agua. El estudio de la altura potencial del oleaje provocado por los huracanes ha permitido adoptar medidas de protección en las poblaciones costeras, levantando enormes rompeolas y barreras contra las mareas. En Galveston, Texas, después de que un huracán provocara 6.000 muertes en septiembre de 1900, se construyeron más de 2.000 edificios sobre pilares de 2 m de altura para reducir su vulnerabilidad al oleaje provocado por los huracanes.

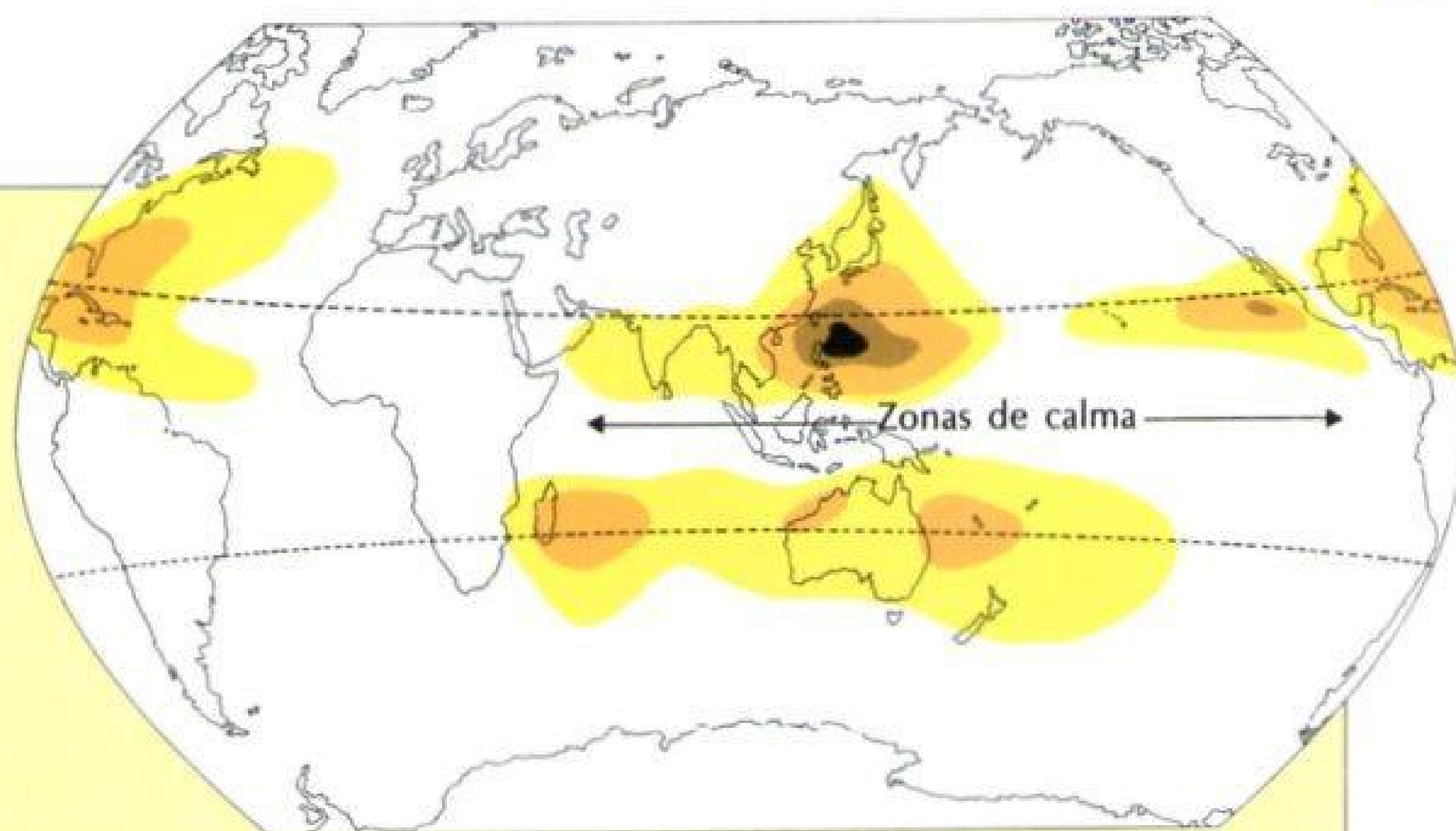
En toda la zona tropical, las comunidades costeras e isleñas viven con el constante temor a la furia del ciclón tropical. Las



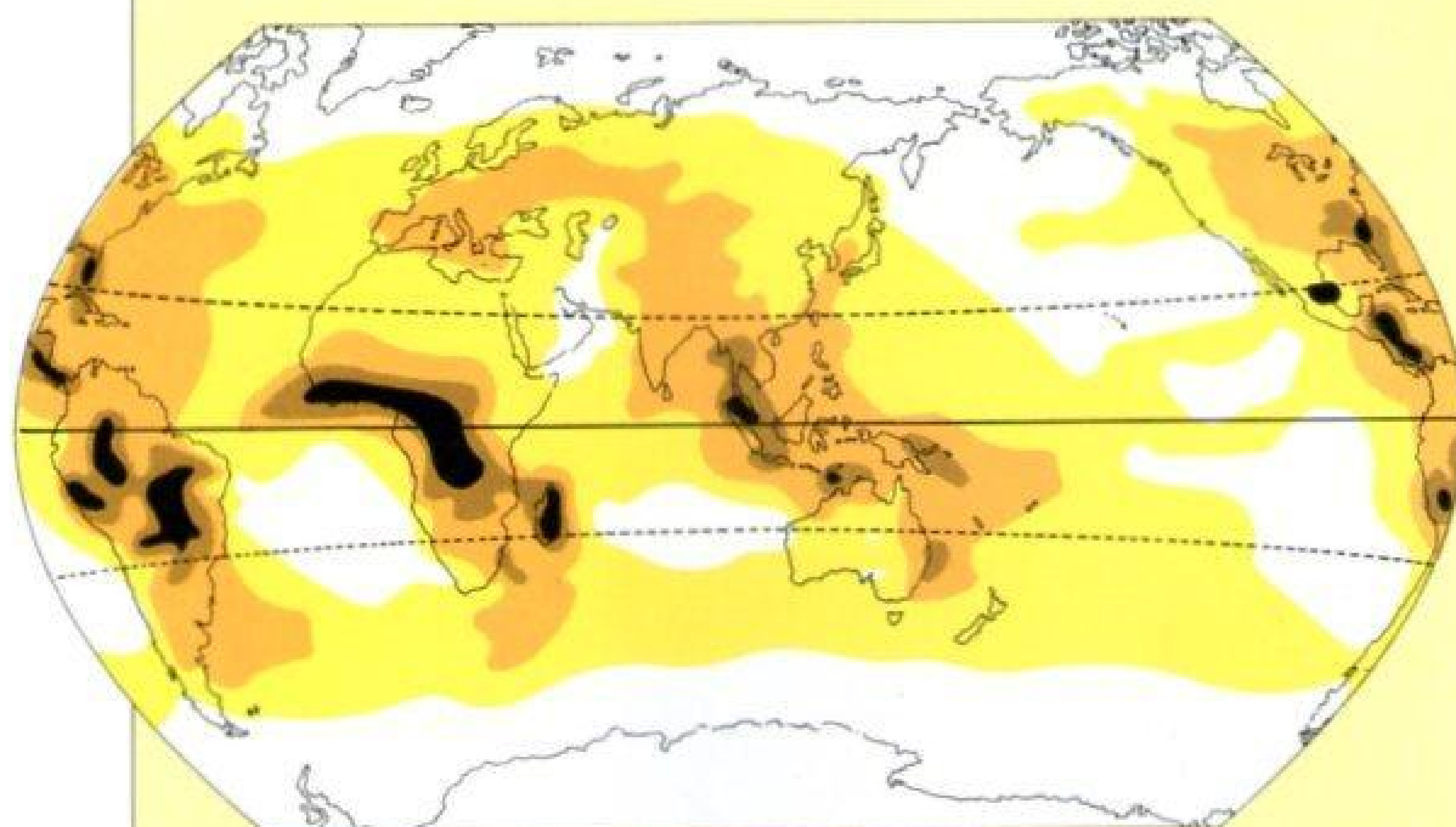
«Agua, agua por todas partes, y ni una gota para beber.» *La agonía de los marineros atrapados en las zonas de calma quedó plasmada con enorme maestría en las ilustraciones de Gustavo Doré para el evocador poema de Coleridge* El viejo marinero.

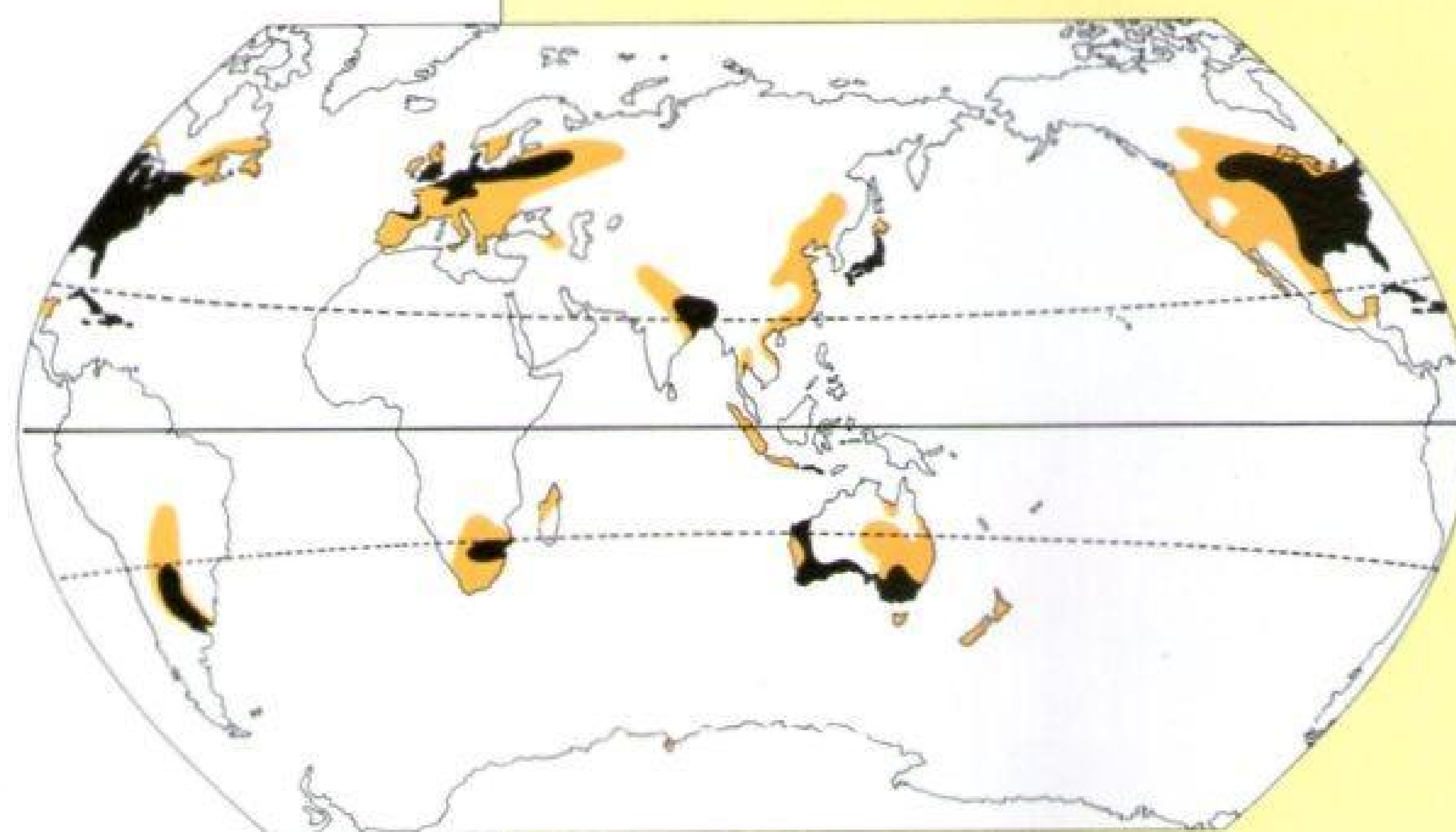
Zonas climáticas extremas

Los ciclones tropicales se forman en regiones donde la temperatura del mar es superior a 27 °C; se desplazan hacia el oeste, y luego se desvían hacia los polos, bajo la influencia de los vientos del oeste de las latitudes medias.



Las tormentas eléctricas son grandes acúmulos de cumulonimbos que provocan granizadas, chubascos, truenos y relámpagos. Tienden a generarse sobre zonas de tierra firme muy calurosas.
Los tornados (mapa inferior) suelen formarse a partir de tormentas en las latitudes medias, ya que ahí es mayor el efecto de la rotación de la Tierra, que es el origen de la fuerza del tornado.





Los huracanes se forman en época de calor, como lo indican estos versos de una antigua canción popular:

Junio, demasiado pronto.
Julio, prepárate.
Agosto, ¡cuidado!
Septiembre, te acordarás.
Octubre, todo acabó.

Para convertirse en un ciclón o huracán, una tormenta tiene que pasar por las fases de perturbación tropical, con vientos de hasta 37 km/h, depresión y borrasca. El huracán se caracteriza por vientos que superan los 119 km/h.

medidas preventivas exigen enormes cantidades de dinero y recursos; los países pobres, como Bangla Desh, amenazado por ciclones que penetran en el golfo de Bengala, tienen muy pocas posibilidades. La situación se agrava debido a la poca altitud de las tierras del delta y su enorme densidad de población. En noviembre de 1970, un ciclón tropical provocó olas de 6 m de altura que ahogaron a medio millón de personas.

Cuando llegan a tierra firme, los huracanes empiezan a declinar, al faltarles la energía aportada por el mar y verse sometidos a los efectos de la fricción. Pero aún siguen siendo peligrosos. Al disminuir la velocidad del huracán, la rotación se divide entre las tormentas que lo componen, y pueden producirse tornados.

En 1967, el huracán Beulah engendró 141 tornados después de llegar a las costas norteamericanas. Por lo general, en esta fase caen fuertes lluvias (de 127 a 254 mm), lo cual beneficia a los agricultores..., pero a costa de grandes inundaciones.

El 22 de mayo de 1987, casi la totalidad de los 185 habitantes del pueblecito texano de Saragosa se encontraba reunida en el ayuntamiento. De pronto, una nube negra y giratoria en forma de embudo cayó del cielo con un ruido ensordecedor. El edificio del ayuntamiento quedó destrozado en cuestión de segundos; murieron 40 personas y otras 100 resultaron heridas.

El tornado que destruyó Saragosa fue uno de los mil que se registran cada año en Estados Unidos.

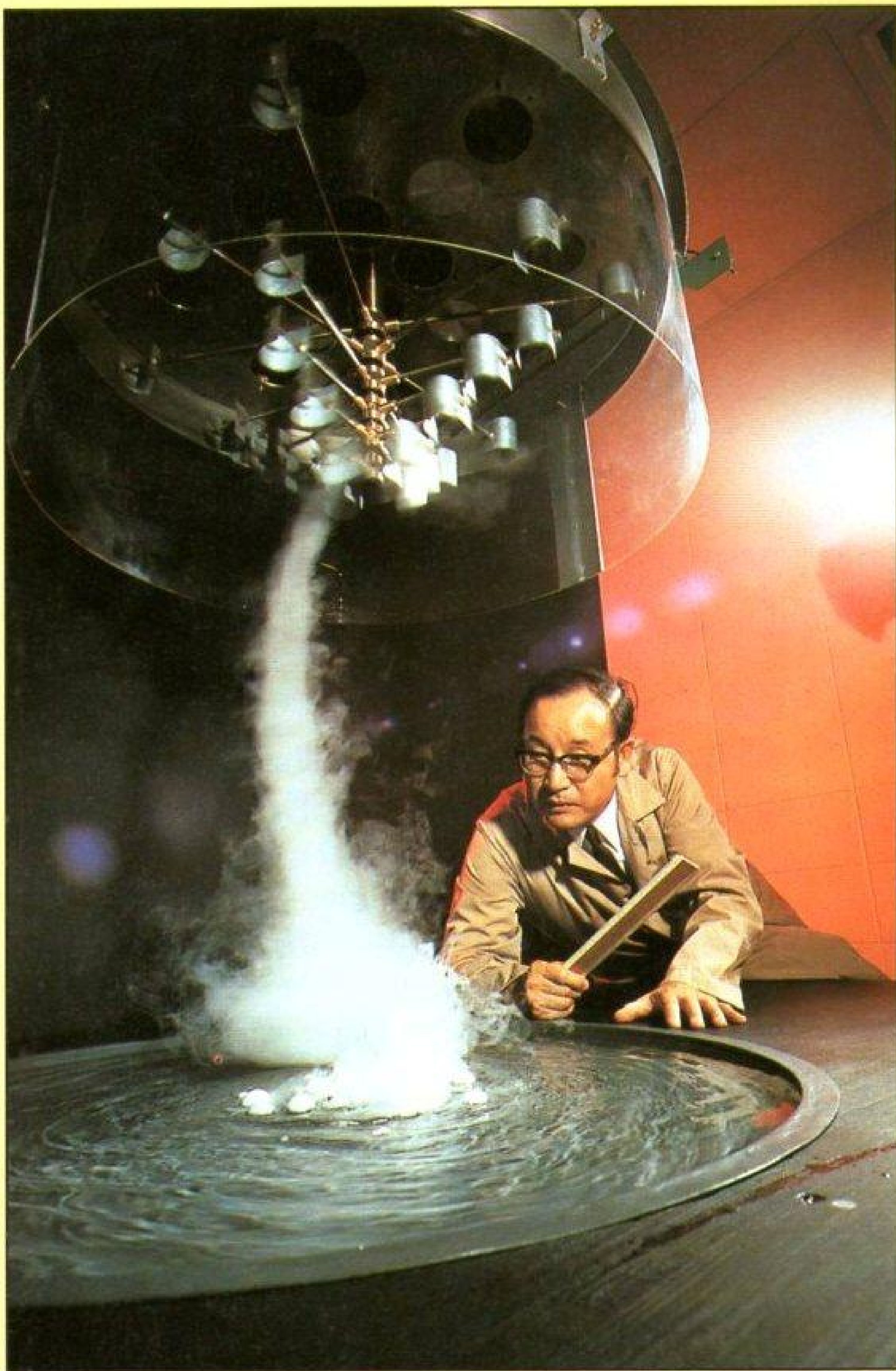
Los daños materiales y humanos que provocan los tornados han sido la causa de que se dedique un considerable esfuerzo al estudio de los mismos. Sin embargo, al cabo de décadas de investigación aún siguen sin respuesta muchas preguntas, y algunos meteorólogos opinan que quizá no existan tales respuestas.

Los tornados no suelen superar unos cuantos cientos de metros de diámetro y a veces no duran más que unos pocos minutos. Sin embargo, durante su breve existencia pueden dejar un rastro de absoluta destrucción. Su pequeña magnitud y su corta duración hacen sumamente difícil predecir con exactitud dónde y cuándo se formarán.

Un tornado es un vórtice giratorio en forma de embudo, que desciende desde la base de una nube espesa de tormenta, hasta tocar el suelo. Las tormentas se causan por elevación del aire húmedo y cálido; y en sus casos más extremos, la formación de un vórtice constituye el medio más eficiente para elevar con rapidez este aire hasta la base de la tormenta.

El tornado se forma cuando el aire asciende en remolino, por lo general bajo la influencia de otros movimientos de aire dentro de la tormenta misma.

Las trombas marinas son tornados que se forman sobre el agua, pero la escasa fricción superficial de ésta hace que el vórtice se forme con más facilidad sobre el agua que sobre tierra firme. Por eso, muchas trombas de agua resultan mucho menos violentas que los tornados y pueden formarse a partir de simples cúmulos, no necesariamente nubes de tormenta. Aun así, las trombas más fuertes pueden hundir barcos y provocar graves daños en las poblaciones costeras. En 1879, las trombas de agua destruyeron el famoso puente de Tay en Escocia, provocando el descarrilamiento del tren correo de Edimburgo, en el que murieron 75 pasajeros.



Tetsuya Fujita, profesor de meteorología en la Universidad de Chicago, es el «rey» indiscutible de los expertos en tornados. Empezó a interesarse por el tema en 1945, siendo un estudiante de 24 años, cuando tuvo que estudiar los daños provocados por los tornados que se formaron a consecuencia de la explosión atómica de Hiroshima. Desde entonces, Fujita ha seguido el rastro de cientos de tornados y estudiado sus efectos, y es el inventor de una máquina que reproduce la formación de un tornado, utilizando hielo seco como fuente de humedad y recipientes giratorios instalados bajo un ventilador de succión, con lo que consigue crear un remolino ascendente de aire. Poco a poco se van desentrañando las causas y el funcionamiento de estas terroríficas manifestaciones de la furia de los elementos.

Se producen tornados destructivos en las latitudes medias de ambos hemisferios. Por fortuna menos del 1 por 100 de las tormentas engendran tornados.

Por término medio, cada año mueren en el mundo de 300 a 400 personas, víctimas de los tornados; la cuarta parte de las víctimas se producen en EE.UU, y serían muchas más de no ser por las constantes advertencias del servicio meteorológico a las poblaciones.

El radar ha resultado decisivo a la hora de identificar, detectar y rastrear tormentas con potencial de crear tornados. Sólo se dispone de unos pocos minutos para dar la alarma antes de que el tornado ataque, pero con eso suele bastar para que la gente busque refugio.

En el Medio Oeste de los EE.UU. existe una franja de terreno denominada Tornado Alley (el callejón de los tornados), de 800 km de longitud y 650 de anchura, donde los tornados son tan frecuentes que casi todas las viviendas disponen de sótanos especialmente construidos para servir de refugio.

El tornado representa un gran peligro, con sus vientos que alcanzan los 400 km/h, su increíble fuerza de succión y los súbitos descensos de la presión atmosférica que provoca su paso.

La combinación de estos efectos puede hacer explotar un edificio; camiones, coches e incluso locomotoras son levantados y arrastrados a grandes distancias; la arena y la grava pueden acribillar los cuerpos humanos como una descarga de perdigones; la fuerza del viento puede clavar pajas en las tablas de madera, retorcer los troncos de los árboles como sacacorchos, y desplumar a las gallinas.

No obstante, los tornados también pueden tener su lado amable. En 1986, un tornado que se produjo en China se llevó por los aires a 13 niños, transportándolos a 19 km de distancia y depositándolos ilesos en una zona de dunas y matorrales.

Los Estados Unidos padecen la mayor tasa mundial de tornados de efectos destructivos. Este violento torbellino que avanza sobre los campos de Utah ha absorbido tierra y escombros, que forman una «funda» turbulenta alrededor del tornado, el cual acabará por desvanecerse tan rápidamente como se formó.



En agosto de 1694, una tromba de agua arrasó el puerto de Topsham, en el suroeste de Inglaterra. Los habitantes, indignados, culparon de los destrozos a la Marina, por no haber disparado sus cañones contra el monstruo.

Rayos en el cielo

Las tormentas generan una increíble variedad de fenómenos meteorológicos: rayos deslumbrantes, truenos aterradores, lluvia torrencial, granizadas devastadoras, ráfagas de viento borrascoso e incluso «lluvias» de animales.

Una tormenta se forma cuando una fuerte corriente ascendente de aire caliente y húmedo transforma una pequeña nube del tipo cúmulo en un denso cumulonimbo, de 10 a 25 km de altura y unos 8 km de anchura, en menos de una hora. Junto a la corriente de aire que asciende bajan corrientes de aire más frío, lo cual origina una situación de extrema turbulencia en el interior de la nube. La rápida corriente ascendente favorece la formación de gotas de agua, cristales de hielo y granizo, y las colisiones entre estos elementos generan cargas eléctricas, que acaban por provocar relámpagos.

Aún no se conocen todos los detalles de este proceso, pero sabemos que las cargas eléctricas positivas se transfieren a la parte alta de la nube, mientras que las negativas se transfieren a las partes inferior y media. Llega un momento en que existe una diferencia de millones de voltios entre estos niveles, así como entre la parte baja de la nube y la superficie de la tierra, cargada positivamente. Esta diferencia provoca gigantescas descargas —rayos—, que pueden producirse en el seno de la nube o entre la nube y la tierra.

El mérito de haber descifrado el misterio del rayo, demostrando que se trata de una forma de electricidad, corresponde al científico y estadista norteamericano Benjamin Franklin (1706-1790). En julio de 1752, Franklin hizo volar una cometa confeccionada con un pañuelo de seda, introduciéndola en una nube de tormenta; cerca del extremo del cordel ató una llave metálica. Al acercar la mano a la llave, saltaban chispas de una a otra. En 1909, un científico sueco llamado Engelstad resultó muerto al tratar de repetir el experimento de Franklin.

En cualquier momento dado, se están produciendo en el mundo 1.800 tormentas eléctricas, lo cual significa 6.000 rayos por minuto. El canal por donde circula el rayo es tan fino como un lapiz, y se calienta hasta una temperatura de 30.000 °C en menos de una milésima de segundo. Esto hace que el aire caliente del canal se expanda con enorme rapidez, originando una onda de choque que produce el ruido que llamamos trueno. Si el rayo cae sobre una superficie húmeda, como un árbol o una pared



Algunos pueblos aún creen que el rayo y el trueno son las armas de los dioses.
A la izquierda, *bastón nigeriano con la figura de Oshe, dios de la tormenta; cuando amenaza tormenta, se agita el bastón mientras se entonan oraciones.*



Los dedos llameantes del rayo rasgan el cielo nocturno, a modo de advertencia de su poder letal.



mojada, la evaporación instantánea de la humedad provoca una expansión tan violenta que se siente como una explosión.

El rayo busca siempre el punto del suelo con menos resistencia eléctrica, por lo cual tiende a caer sobre árboles, colinas y edificios altos. El peor sitio para refugiarse cuando hay tormenta es bajo un árbol alto y aislado. Como el árbol no es tan buen conductor eléctrico como el cuerpo humano, si cae un rayo sobre él la persona puede sufrir una descarga lateral.

También corren grave peligro las personas que trabajan o hacen deporte al aire libre. Tener en las manos un objeto metálico, como un palo de golf, un paraguas, una escopeta o un rastrillo, aumenta las posibilidades de atraer un rayo, que puede causar graves quemaduras, dañar órganos vitales e incluso parar el corazón. Afortunadamente, sólo fallece un 25 por 100 de las víctimas del rayo.

El lugar más seguro es el interior de una casa o un coche. Si cae un rayo sobre un coche, la corriente fluye por el metal de la carrocería sin causar daño a los ocupantes, y se descarga en el suelo a través de los neumáticos mojados. En 1979, un rayo cayó en Texas sobre un camión, matando a los tres ocupantes de la caja pero sin hacer ningún daño a los de la cabina.

En el interior de la tormenta, las turbulentas corrientes de aire provocan remolinos, haciendo subir y bajar las gotas de agua y cristales de hielo; estos últimos van acumulando capas de hielo transparente y opaco, hasta formar granizo. Se han examinado piezas de granizo del tamaño de un pomelo, formadas por 25 capas de hielo. Cuando el granizo se hace demasiado pesado para que la tormenta lo sostenga, cae como una lluvia de proyectiles, una plaga blanca que lo destruye todo.

En ocasiones se encuentra algún fragmento de granizo muy grande, formado alrededor de un núcleo extraño. En 1882 cayeron en Dubuque, Iowa, dos granizos muy grandes que contenían ranas (aún seguían vivas cuando el hielo se derritió); y cerca de Vicksburg, Mississippi, cayó en 1894 otro fragmento de hielo que contenía una tortuga de tierra del tamaño de un ladrillo. En Bournemouth, Inglaterra, durante una granizada caída en 1983, se comprobó que cientos de pedriscos —de 5 a 7,5 cm de diámetro— contenían trozos de carbón. Mediante hábiles tácticas detectivescas, los meteorólogos consiguieron localizar la carbonería de donde procedía el carbón, elevado por fuertes corrientes de aire ascendente.

De vez en cuando, cae una pieza de granizo verdaderamente colosal. Una de ellas cayó en 1973 a los pies de un meteorólogo de Manchester, Inglaterra, después de un relámpago aislado. Estaba compuesta por 51 capas alternantes, de hielo transparente y burbujas. Al caer se fracturó, pero los fragmentos pesaban entre 1,5 y 2 kg. No se encontraron impurezas que indicaran que el bloque se hubiera formado alrededor del agua expulsada por el desagüe de algún avión. Parece que lo formó el propio rayo, por algún proceso desconocido.

Los fenómenos meteorológicos son siempre sorprendentes, pero a veces resultan verdaderamente asombrosos, como cuando caen del cielo objetos extraños, e incluso animales, en lugares muy alejados de cualquier posible punto de origen. Por lo general, estos incidentes se achacan a la tormenta y sus vástagos, el tornado y la tromba de agua, cuya potencia y extravagancia están aún por explicar.

Lluvias de animales

En ocasiones caen del cielo lluvias de ranas, peces, cangrejos, anguilas, renacuajos, avellanas, caracoles, lombrices e incluso larvas de mosca.

Para las gentes que ven caer semejante lluvia sobre sus cabezas, el fenómeno constituye un misterio inexplicable.

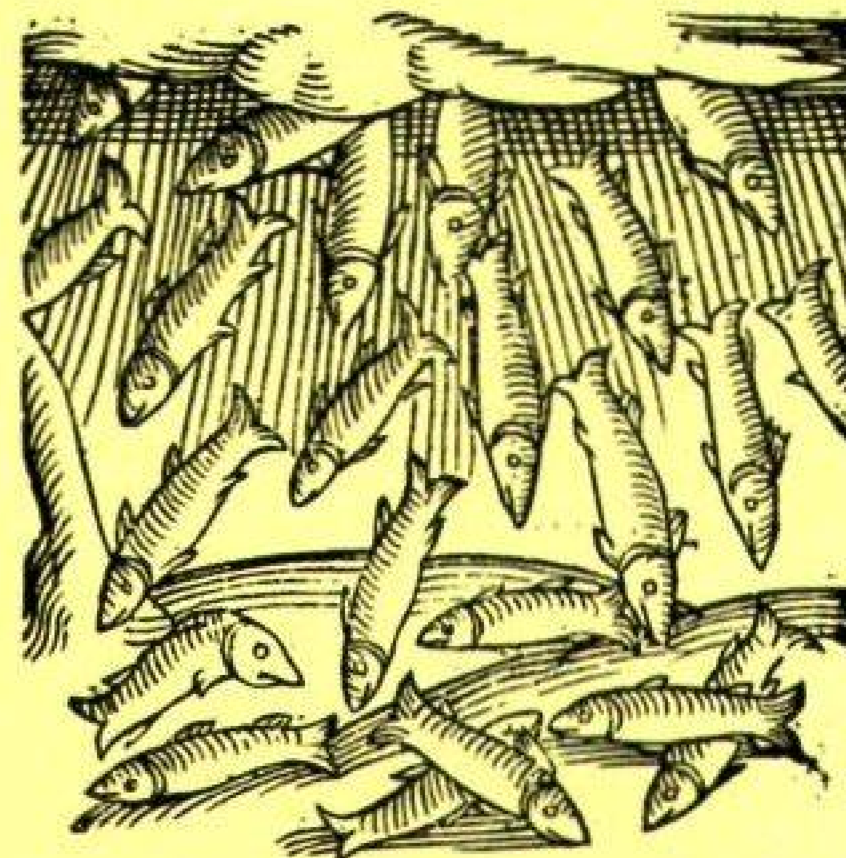
Los científicos procuran explicar estos prodigios atribuyéndoselos a las tormentas. Las corrientes de aire de tormenta que ascienden a 96 km/h, o la tremenda succión de un tornado o una tromba de agua pueden aportar, en ocasiones excepcionales, la fuerza necesaria. Si la tormenta pasa sobre un río o un estanque poco profundo, puede absorber todo su contenido, arrastrándolo a gran distancia antes de dejarlo caer.

Pero algunos casos siguen resultando difíciles de explicar, y son tan extraordinarios que han pasado a la leyenda.

En el siglo IV se produjo en el distrito griego de Quersoneso una lluvia de peces que duró tres días. Cayeron tantos peces que bloquearon las calles, impidiendo abrir las puertas. No tiene nada de extraño que el pueblo siguiera oliendo a pescado durante semanas enteras.



Una lluvia de peces ocurrida en Sajonia en 989, y una lluvia de ranas o sapos en 1355, dos de los incidentes que aparecen ilustrados en la Crónica de maravillas y espectáculos, libro publicado en 1557. Estos extraordinarios sucesos se atribuían a causas sobrenaturales.



Nube en forma de yunque, que señala la dirección en que se mueve la tormenta

Fuertes corrientes ascendentes

La circulación constante de cristales de hielo forma granizo

Fuertes corrientes descendentes

Lluvia o granizo

El aire caliente, absorbido por la base de la tormenta, puede arrastrar animales pequeños

Descargas eléctricas entre la tierra cargada positivamente y la nube cargada negativamente



El famoso experimento de Benjamin Franklin con la cometa demostró que las tormentas generan electricidad. En una repetición del experimento, Luis XVI de Francia hizo pasar una corriente a través de 200 monjes cogidos de las manos.

La forma más corriente de nube de tormenta es el cumulonimbo negro, con la parte superior en forma de yunque, que puede alcanzar los 16 km de altura y extenderse a lo largo de 64 a 80 km. En el interior de esta enorme nube suben y bajan fuertes corrientes de aire, que hacen caer lluvias torrenciales y granizadas, mientras se descargan rayos entre la tierra y la nube.